

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/002354

International filing date: 16 February 2005 (16.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2004-038961
Filing date: 16 February 2004 (16.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 14 April 2005 (14.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

18.02.2005

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2004年 2月16日
Date of Application:

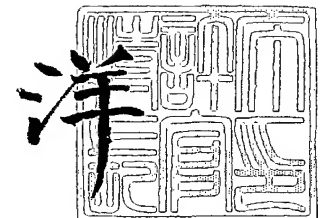
出願番号 特願2004-038961
Application Number:
[ST. 10/C]: [JP2004-038961]

出願人 本田技研工業株式会社
Applicant(s):

2005年 3月31日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小川



【書類名】 特許願
【整理番号】 PSK72291HW
【提出日】 平成16年 2月16日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 B25J 5/00
G05D 1/02

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 竹中 透

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 松本 隆志

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 吉池 孝英

【特許出願人】
【識別番号】 000005326
【氏名又は名称】 本田技研工業株式会社

【代理人】
【識別番号】 100077805
【弁理士】
【氏名又は名称】 佐藤 辰彦

【選任した代理人】
【識別番号】 100077665
【弁理士】
【氏名又は名称】 千葉 剛宏

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 015174
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9711295

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

- 1) 歩容の要求条件を満足あるいは概ね満足するように、第1動力学モデルを用いて歩容パラメータを決定し、
2) 決定された歩容パラメータを基に、第2動力学モデルを用いて歩容を生成し、
3) 生成された歩容に対して前記要求条件からのずれを求め、
4) 前記ずれが小さくなるように、前記歩容パラメータを修正することを特徴とする移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 2】

- 1) 所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成される目標歩容が、所定の境界条件を満足するように、前記パラメータの組を仮決定する、第1動力学モデル歩容パラメータ決定手段と、
2) 前記仮決定された歩容パラメータの組を基に、第2の動力学モデル上で前記所定の期間の歩容を生成し、生成された歩容に対し、前記所定の境界条件からのずれを求める、第2動力学モデル歩容ずれ算出手段と、
3) 前記ずれが小さくなるようにあるいは略0となるように、前記仮決定された歩容パラメータの組の中の所定のパラメータを修正する歩容パラメータ修正手段と
を備えることを特徴とする移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 3】

所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成された目標歩容に対する前記所定の境界条件からのずれと前記修正される所定のパラメータとの間の線形性が、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第2の動力学モデル上で生成された目標歩容に対する前記所定の境界条件からのずれと前記修正される所定のパラメータとの間の線形性よりも高いことを特徴とする請求項2記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 4】

第1動力学モデル歩容パラメータ決定手段が、前記パラメータの組を解析的に求めて仮決定することを特徴とする請求項2記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 5】

所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成する際の演算量が、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第2の動力学モデル上で生成する際の演算量よりも少ないことを特徴とする請求項2記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 6】

第1動力学モデルにおける全体質量に対する脚の質量比が第2動力学モデルにおける全体質量に対する脚の質量比よりも小さい、あるいは、第1動力学モデルにおける脚の質量が0であることを特徴とする請求項2記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 7】

第1動力学モデルおよび第2動力学モデル上で生成される歩容が、運動およびまたは力（関節角、アクチュエータトルク、アクチュエータ速度、床反力水平成分など）に関する所定の許容範囲を越えないように生成されるものであり、第2動力学モデル用の許容範囲が第1動力学モデル用の許容範囲よりも狭く設定されることを特徴とする請求項2記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 8】

任意の目標運動に対する床反力が、第A動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力と第B動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力との、所定の重み $W1$ を用いた重み付き平均である動力学モデルを第1動力学モデルとし、

任意の目標運動に対する床反力が、第A動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力と第B動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力との、 $W1$ と異なる所定の重み $W2$ を用いた重み付き平均である動力学モデルを第2動力学モデルとすることを特徴とする請

求項 2 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 9】

前記修正される所定のパラメータが、動力学モデルの初期状態または終端状態（特に上体の位置・速度、姿勢角、姿勢角速度）であることを特徴とする請求項 2 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 10】

前記修正される所定のパラメータが、目標 ZMP 軌道に関するパラメータであることを特徴とする請求項 2 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 11】

前記所定の境界条件が、前記所定の期間の歩容の境界における上体位置・速度、上体姿勢角・角速度、全体重心位置・速度、上体位置と速度の重み付き平均（発散成分）、上体姿勢角と角速度重み付き平均、全体重心位置と速度の重み付き平均の少なくともいずれかの状態量の値が、前記境界において隣接する歩容の前記状態量の値と一致することであることを特徴とする請求項 2 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 12】

前記歩容パラメータ修正手段が、前記仮決定された歩容パラメータの組の近傍に第 n ($n=2, \dots$) の組を決定し、第 n の組を基に、第 2 動力学モデル上で前記所定の期間の歩容を生成し、生成された歩容に対し、前記所定の境界条件からのずれたる第 n ずれを求め、前記仮決定された歩容パラメータの組、第 n の組、第 2 動力学モデル歩容ずれ算出手段が求めたずれ、第 n ずれを基に、前記所定のパラメータの修正量を決定することであることを特徴とする請求項 2 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 13】

1) 歩容に関する要求を入力し、歩容を生成するための複数のパラメータから成る組である歩容パラメータの組のうちの所定のパラメータを優先パラメータとして、前記要求を満足するための前記優先パラメータの値たる優先パラメータ要求値を優先的に（直接的に）決定する優先パラメータ要求値決定手段と、

2) 基準歩容としてあらかじめ用意され、あるいは前の 1 歩で生成され、所定の境界条件を満足あるいは概ね満足するように設定された歩容の歩容パラメータの組の値をベース値とし、前記優先パラメータに関しては、ベース値よりも優先パラメータ要求値に近づくように、あるいは優先パラメータ要求値に一致するように設定し、前記要求パラメータ以外のパラメータに関しては、ベース値に一致あるいは略一致するように設定した歩容パラメータの組をパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値決定手段と、

3) 前記パラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する探索手段とを備えたことを特徴とする移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 14】

1) 歩容に関する要求を入力し、歩容を生成するための複数のパラメータから成る組である歩容パラメータの組のうちの所定のパラメータを優先パラメータとして、前記要求を満足するための前記優先パラメータの値たる優先パラメータ要求値を優先的に（直接的に）決定する優先パラメータ要求値決定手段と、

2) 基準歩容としてあらかじめ用意され、あるいは前の 1 歩で生成され、所定の境界条件を満足あるいは概ね満足するように設定された歩容の歩容パラメータの組の値をベース値とし、前記優先パラメータに関しては、ベース値よりも優先パラメータ要求値に近づくように設定し、前記優先パラメータ以外のパラメータに関しては、ベース値に一致あるいは略一致するように設定した歩容パラメータの組をパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値決定手段と、

3) 前記パラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する探索手段と、

- 4) 前記パラメータ初期候補値のうちの前記探索パラメータの値を探索手段が決定した値に設定し、前記優先パラメータの値を優先パラメータ要求値にさらに近づくように、あるいは優先パラメータ要求値に一致するように設定したものを新たなパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値再決定手段と、
- 5) パラメータ初期候補値再決定手段が決定したパラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する再探索手段と
- を備えたことを特徴とする移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 15】

前記探索パラメータが、動力学モデルの初期状態または終端状態（特に上体の位置・速度、姿勢角、姿勢角速度）であることを特徴とする請求項 13 または 14 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【請求項 16】

前記探索パラメータが、目標ZMP軌道に関するパラメータであることを特徴とする請求項 13 または 14 記載の目標歩容生成装置。

【請求項 17】

前記境界条件が、歩容の境界における上体位置・速度、上体姿勢角・角速度、全体重心位置・速度、上体位置と速度の重み付き平均（発散成分）、上体姿勢角と角速度重み付き平均、全体重心位置と速度の重み付き平均の少なくともいずれかの状態量の値が、前記境界において隣接する歩容の前記状態量の値と一致することであることを特徴とする請求項 13 または 14 記載の移動ロボットの目標歩容生成装置。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 移動ロボットの歩容生成装置

【技術分野】

【0001】

本発明は2足移動ロボット等の移動ロボットの歩容を生成する装置に関する。

【背景技術】

【0002】

2足移動ロボット等の移動ロボットの目標歩容を生成する技術としては、例えば特開2002-326173号公報（特許文献1）や、PCT国際公開公報WO/03/057427/A1（特許文献2）に見られるものが本願出願人により提案されている。これらの文献に見られる技術は、ロボットの運動（各部位の位置、姿勢）と、床反力との関係を表す第1の動力学モデル（単純化モデル）を用いて該第1の動力学モデル上での動力学平衡条件（床反力の並進力成分が目標値になる、ある点のまわりの床反力モーメントが目標値になるなどの条件）を満足するようにロボットの目標運動の瞬時値（瞬時目標運動）と目標床反力の瞬時値（瞬時目標床反力）とからなる瞬時目標歩容が逐次作成される。そして、この瞬時目標歩容を第2の動力学モデル（フルモデル）に入力して、該瞬時目標運動の一部（目標上体位置姿勢や目標ZMPまわりの目標モーメントなど）を補正することで、最終的な瞬時目標歩容を時系列的に生成するようにしている。

【0003】

この場合、第1の動力学モデル（単純化モデル）としては、線形性の高いモデルが一般に使用される。線形性の高い動力学モデルを用いて瞬時目標歩容を作成することで、仮想的な周期的歩容である定常歩容につながり、もしくは漸近するような歩容（ロボットの安定な運動を継続的に行い得る歩容）を効率よく短時間で作成することが可能となり、ひいては実ロボットの実際の運動を行いながら、リアルタイムでロボットの瞬時目標歩容を逐次生成することが可能となる。

【0004】

ところが、線形性の高い動力学モデルは、ロボットの種々様々の動作において一般に動力学精度が比較的低くなりがちである。すなわち、その動力学モデル上でのロボットの動力学は、実ロボットの実際の動力学に対して誤差を生じやすい。このため、第1の動力学モデルを用いて作成される瞬時目標歩容を、そのまま実ロボットに適用して、該実ロボットの動作を行わせると、第1の動力学モデル上で保証された動力学平衡条件が、実ロボット上では成立せず、実ロボットの動作が安定性に欠けるものとなりやすい。

【0005】

そこで、前記特許文献1、2に見られる技術では、第1の動力学モデルを用いて作成した瞬時目標歩容の一部をさらに、第2の動力学モデルを用いて補正するようにしている。この場合、第2の動力学モデルとしては、第1の動力学モデルよりも動力学精度の高いモデルが用いられる。これにより、第1の動力学モデルを用いて作成した歩容よりも、より動力学精度の高い（実ロボットの動力学により近い）歩容を生成することが可能となる。

【0006】

しかし、前記特許文献1、2に見られる技術では、第2動力学モデルを用いて作成される歩容は発散しやすいため、目標ZMP軌道を修正するもしくは目標ZMPまわりに床反力モーメントを発生させるようにして、ロボットの目標運動軌道が第1の動力学モデルで作成された歩容からかけはなれないようにする必要があった。そして、この場合、目標ZMP軌道の修正量や、目標ZMPまわりの床反力モーメントが比較的大きくなることがあり、このような場合には、安定余裕を高く保つことが困難となる場合があった。逆に、安定余裕を高く保つために、目標ZMP軌道の修正量や、目標ZMPまわりの床反力モーメントの許容範囲を狭く設定すると、歩容が発散する恐れが高まるという不具合があった。

。

【特許文献1】 特開2002-326173号公報

出証特2005-3028321

【特許文献2】PCT国際公開公報WO/03/057427/A1

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、歩容の発散を防止しつつ、所要の境界条件を高い動力学の精度で満足し得る目標歩容を効率よく生成することができる移動ロボットの目標歩容生成装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

かかる目的を達成するために、本発明の第1発明の移動ロボットの目標歩容生成装置は、

- 1) 歩容の要求条件を満足あるいは概ね満足するように、第1動力学モデルを用いて歩容パラメータを決定し、
- 2) 決定された歩容パラメータを基に、第2動力学モデルを用いて歩容を生成し、
- 3) 生成された歩容に対して前記要求条件からのずれを求め、
- 4) 前記ずれが小さくなるように、前記歩容パラメータを修正することを特徴とする。

【0009】

また、第2発明は、

- 1) 所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成される目標歩容が、所定の境界条件を満足するように、前記パラメータの組を仮決定する、第1動力学モデル歩容パラメータ決定手段と、
- 2) 前記仮決定された歩容パラメータの組を基に、第2の動力学モデル上で前記所定の期間の歩容を生成し、生成された歩容に対し、前記所定の境界条件からのずれを求める、第2動力学モデル歩容ずれ算出手段と、
- 3) 前記ずれが小さくなるようにあるいは略0となるように、前記仮決定された歩容パラメータの組の中の所定のパラメータを修正する歩容パラメータ修正手段とを備えることを特徴とする。

【0010】

また、第3発明は、第2発明において、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成された目標歩容に対する前記所定の境界条件からのずれと前記修正される所定のパラメータとの間の線形性が、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第2の動力学モデル上で生成された目標歩容に対する前記所定の境界条件からのずれと前記修正される所定のパラメータとの間の線形性よりも高いことを特徴とする。

【0011】

また、第4発明は、第2発明において、第1動力学モデル歩容パラメータ決定手段が、前記パラメータの組を解析的に求めて仮決定することを特徴とする。

【0012】

また、第5発明は、第2発明において、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第1の動力学モデル上で生成する際の演算量が、所定の期間の歩容を記述するパラメータの組を基に第2の動力学モデル上で生成する際の演算量よりも少ないことを特徴とする。

【0013】

また、第6発明は、第2発明において、第1動力学モデルにおける全体質量に対する脚の質量比が第2動力学モデルにおける全体質量に対する脚の質量比よりも小さい、あるいは、第1動力学モデルにおける脚の質量が0であることを特徴とする。

【0014】

また、第7発明は、第2発明において、第1動力学モデルおよび第2動力学モデル上で生成される歩容が、運動およびまたは力（関節角、アクチュエータトルク、アクチュエータ速度、床反力水平成分など）に関する所定の許容範囲を越えないように生成されるもの

であり、第2動力学モデル用の許容範囲が第1動力学モデル用の許容範囲よりも狭く設定されることを特徴とする。

【0015】

また、第8発明は、第2発明において、任意の目標運動に対する床反力が、第A動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力と第B動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力との、所定の重み $W1$ を用いた重み付き平均である動力学モデルを第1動力学モデルとし、任意の目標運動に対する床反力が、第A動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力と第B動力学モデル上で前記目標運動に釣り合う床反力との、 $W1$ と異なる所定の重み $W2$ を用いた重み付き平均である動力学モデルを第2動力学モデルとすることを特徴とする。

【0016】

また、第9発明は、第2発明において、前記修正される所定のパラメータが、動力学モデルの初期状態または終端状態（特に上体の位置・速度、姿勢角、姿勢角速度）であることを特徴とする。

【0017】

また、第10発明は、第2発明において、前記修正される所定のパラメータが、目標ZMP軌道に関するパラメータであることを特徴とする。

【0018】

また、第11発明は、第2発明において、前記所定の境界条件が、前記所定の期間の歩容の境界における上体位置・速度、上体姿勢角・角速度、全体重心位置・速度、上体位置と速度の重み付き平均（発散成分）、上体姿勢角と角速度重み付き平均、全体重心位置と速度の重み付き平均の少なくともいずれかの状態量の値が、前記境界において隣接する歩容の前記状態量の値と一致することであることを特徴とする。

【0019】

また、第12発明は、第2発明において、前記歩容パラメータ修正手段が、前記仮決定された歩容パラメータの組の近傍に第 n ($n=2, \dots$) の組を決定し、第 n の組を基に、第2動力学モデル上で前記所定の期間の歩容を生成し、生成された歩容に対し、前記所定の境界条件からのずれたる第 n ずれを求め、前記仮決定された歩容パラメータの組、第 n の組、第2動力学モデル歩容ずれ算出手段が求めたずれ、第 n ずれを基に、前記所定のパラメータの修正量を決定することを特徴とする。

【0020】

なお、第1～第12発明において、第1および第2動力学モデルは、ロボットの運動と床反力との関係を記述する動力学方程式が互いに異なるものであればよいことはもちろんであるが、動力学方程式が互いに同一であっても、その動力学方程式の1つ以上のパラメータに付加される制約条件（力の許容範囲など）が異なるものであればよい。

【0021】

また、第3～第12発明は、それらを適宜複合させるようにしてもよい。

【0022】

前記第1～第12発明によれば、第2動力学モデルによる歩容探索における探索初期候補パラメータ値が、前記所定の境界条件を満足するパラメータ値に近い値となるので、探索の収束効率が高い。また、境界条件を満足するパラメータを探索的に求める際に、探索初期候補パラメータ値を基に生成した歩容が発散しすぎて、より適切な歩容パラメータ候補値を決定できなくなるおそれが少なくなる。また、従来の技術のように、歩容の発散を防止するための目標ZMP軌道の修正量、あるいは、目標ZMPまわりの床反力モーメントが比較的大きくなったりすることがないので、安定余裕を高く保つことができる。

【0023】

また、第13発明の移動ロボットの目標歩容生成装置は、

1) 歩容に関する要求を入力し、歩容を生成するための複数のパラメータから成る組である歩容パラメータの組のうちの所定のパラメータを優先パラメータとして、前記要求を満足するための前記優先パラメータの値たる優先パラメータ要求値を優先的に（直接的に）

決定する優先パラメータ要求値決定手段と、

2) 基準歩容としてあらかじめ用意され、あるいは前の1歩で生成され、所定の境界条件を満足あるいは概ね満足するように設定された歩容の歩容パラメータの組の値をベース値とし、前記優先パラメータに関しては、ベース値よりも優先パラメータ要求値に近づくように、あるいは優先パラメータ要求値に一致するように設定し、前記要求パラメータ以外のパラメータに関しては、ベース値に一致あるいは略一致するように設定した歩容パラメータの組をパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値決定手段と、

3) 前記パラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する探索手段と

を備えたことを特徴とする。

【0024】

また、本発明の第14発明の移動ロボットの目標歩容生成装置は、

1) 歩容に関する要求を入力し、歩容を生成するための複数のパラメータから成る組である歩容パラメータの組のうちの所定のパラメータを優先パラメータとして、前記要求を満足するための前記優先パラメータの値たる優先パラメータ要求値を優先的に（直接的に）決定する優先パラメータ要求値決定手段と、

2) 基準歩容としてあらかじめ用意され、あるいは前の1歩で生成され、所定の境界条件を満足あるいは概ね満足するように設定された歩容の歩容パラメータの組の値をベース値とし、前記優先パラメータに関しては、ベース値よりも優先パラメータ要求値に近づくように設定し、前記優先パラメータ以外のパラメータに関しては、ベース値に一致あるいは略一致するように設定した歩容パラメータの組をパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値決定手段と、

3) 前記パラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する探索手段と、

4) 前記パラメータ初期候補値のうちの前記探索パラメータの値を探索手段が決定した値に設定し、前記優先パラメータの値を優先パラメータ要求値にさらに近づくように、あるいは優先パラメータ要求値に一致するように設定したものを新たなパラメータ初期候補値として決定するパラメータ初期候補値再決定手段と、

5) パラメータ初期候補値再決定手段が決定したパラメータ初期候補値を探索初期値として、動力学モデルを用いて生成される歩容が前記境界条件を満足あるいは略満足するように、前記歩容パラメータ組のうちの所定の探索パラメータの値を探索することによって決定する再探索手段と

を備えたことを特徴とする。

【0025】

さらに、第15発明は、第13または第14発明において、前記探索パラメータが、動力学モデルの初期状態または終端状態（特に上体の位置・速度、姿勢角、姿勢角速度）であることを特徴とする。

【0026】

また、第16発明は、第13または第14発明において、前記探索パラメータが、目標ZMP軌道に関するパラメータであることを特徴とする。

【0027】

また、第17発明は、第13または第14発明において、前記境界条件が、歩容の境界における上体位置・速度、上体姿勢角・角速度、全体重心位置・速度、上体位置と速度の重み付き平均（発散成分）、上体姿勢角と角速度重み付き平均、全体重心位置と速度の重み付き平均の少なくともいずれかの状態量の値が、前記境界において隣接する歩容の前記状態量の値と一致することであることを特徴とする。

【0028】

かかる第13～第17発明によれば、前記第1～第12発明と同様の効果を奏すること

ができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0029】

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態を説明する。尚、本明細書の実施形態では、移動ロボットとしては2足移動ロボットを例にとる。

【0030】

図1は、本発明の実施形態を適用する2足移動ロボットの全体的構成の概略を示す概略図である。

【0031】

図示の如く、2足移動ロボット（以下、ロボットという）1は上体（ロボット1の基体）3から下方に延設された左右一対の脚体（脚部リンク）2、2を備える。両脚体2、2は同一構造であり、それぞれ6個の関節を備える。その6個の関節は上体3側から順に、股（腰部）の回旋（回転）用（上体3に対するヨー方向の回転用）の関節10R、10Lと、股（腰部）のロール方向（X軸まわり）の回転用の関節12R、12Lと、股（腰部）のピッチ方向（Y軸まわり）の回転用の関節14R、14L、膝部のピッチ方向の回転用の関節16R、16Lと、足首のピッチ方向の回転用の関節18R、18Lと、足首のロール方向の回転用の関節20R、20Lとから構成される。なお、本明細書において、符号R、Lはそれぞれロボット1の右側、左側に対応するものであることを意味する符号である。

【0032】

各脚体2の足首の2つの関節18R（L）、20R（L）の下部には、各脚体2の先端部を構成する足平（足部）22R（L）が取着されると共に、両脚体2、2の最上位には、各脚体2の股の3つの関節10R（L）、12R（L）、14R（L）を介して前記上体3が取り付けられている。上体3の内部には、詳細を後述する制御ユニット60などが格納される。なお、図1では図示の便宜上、制御ユニット60を上体3の外部に記載している。

【0033】

上記構成の各脚体2においては、股関節（あるいは腰関節）は関節10R（L）、12R（L）、14R（L）から構成され、膝関節は関節16R（L）から構成され、足首関節は関節18R（L）、20R（L）から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク24R（L）で連結され、膝関節と足首関節とは下腿リンク26R（L）で連結される。

【0034】

上体3の上部の両側部には左右一対の腕体5、5が取り付けられると共に、上体3の上端部には頭部4が配置される。各腕体5は、3つの関節30R（L）、32R（L）、34R（L）から構成された肩関節と、関節36R（L）から構成された肘関節と、関節38R（L）から構成された手首関節と、この手首関節に連結された手先部40R（L）とを備えている。肩関節と肘関節との間、および肘関節と手首関節との間はそれぞれ剛体状のリンクで構成されている。

【0035】

上記のロボット1の構成により、各脚体2の足平22R（L）は、上体3に対して6つの自由度を与えられている。そして、ロボット1の歩行等の移動中に、両脚体2、2を合わせて $6 \times 2 = 12$ 個（この明細書で「*」はスカラに対する演算としては乗算を、ベクトルに対する演算としては外積を示す）の関節を適宜な角度で駆動することで、両足平22R、22Lの所望の運動を行うことができる。これにより、ロボット1は任意に3次元空間を移動することができる。また、各腕体5は、その肩関節、肘関節、手首関節の回転によって、腕振り等の運動を行うことができる。

【0036】

図1に示す如く、各脚体2の足首関節18R（L）、20R（L）の下方には足平22R（L）との間に公知の6軸力センサ50が介装されている。該6軸力センサ50は、各

脚体 2 の足平 22R (L) の着地の有無、および各脚体 2 に作用する床反力 (接地荷重) 等を検出するためのものであり、該床反力の並進力の 3 方向成分 F_x , F_y , F_z 並びにモーメントの 3 方向成分 M_x , M_y , M_z の検出信号を制御ユニット 60 に出力する。また、上体 3 には、Z 軸 (鉛直方向 (重力方向)) に対する上体 3 の傾斜角およびその角速度およびその角速度を検出するための姿勢センサ 54 が備えられ、その検出信号が該姿勢センサ 54 から制御ユニット 60 に出力される。この姿勢センサ 54 は、図示を省略する加速度センサおよびジャイロセンサを備え、これらのセンサの検出信号が上体 3 の姿勢角 (傾斜角) およびその角速度を検出するために用いられる。また、詳細構造の図示は省略するが、ロボット 1 の各関節には、それを駆動するための電動モータ 64 (図 3 参照) と、その電動モータ 64 の回転量 (各関節の回転角) を検出するためのエンコーダ (ロータリエンコーダ) 65 (図 3 参照) とが設けられ、該エンコーダ 65 の検出信号が該エンコーダ 65 から制御ユニット 60 に出力される。

【0037】

さらに、図 1 では図示を省略するが、ロボット 1 の外部には、ロボット 1 を操縦するためのジョイスティック (操作器) 73 (図 3 参照) が設けられ、そのジョイスティック 73 を操作することで、直進移動しているロボット 1 を旋回させるなどロボット 1 の移動方向を指定する、ロボット 1 の歩行、走行などの運動形態および床面の摩擦状態 (路面状態) を規定する動作のモードを指定するなど、ロボット 1 の歩容に対する要求もしくは制約を必要に応じて制御ユニット 60 に入力できるように構成されている。ジョイスティック 73 は有線もしくは無線により制御ユニット 60 との通信が可能とされている。

【0038】

図 2 は本実施形態における各脚体 2 の先端部分 (各足平 22R (L) を含む) の基本構成を概略的に示す図である。同図に示すように、各足平 22R (L) の上方には、前記 6 軸力センサ 50 との間にはばね機構 70 が装備されると共に、足底 (各足平 22R, L の底面) にはゴムなどからなる足底弾性体 71 が貼られている。これらのばね機構 70 及び足底弾性体 71 によりコンプライアンス機構 72 が構成されている。詳細な図示は省略するが、ばね機構 70 は、足平 22R (L) の上面部に取り付けられた方形状のガイド部材 (図示省略) と、足首関節 18R (L) (図 2 では足首関節 20R (L) を省略している) および 6 軸力センサ 50 側に取り付けられ、前記ガイド部材に弾性材 (ゴムやばね) を介して微動自在に収納されるピストン状部材 (図示省略) とから構成されている。

【0039】

図 2 に実線で表示された足平 22R (L) は、床反力を受けていないときの状態を示している。各脚体 2 が床反力を受けると、コンプライアンス機構 72 のばね機構 70 と足底弾性体 71 とがたわみ、足平 22R (L) は図中に点線で例示したような位置姿勢に移る。このコンプライアンス機構 72 の構造は、着地衝撃を緩和するためだけでなく、制御性を高めるためにも重要なものである。その詳細は、例えば本出願人が先に提案した特開平 5-305584 号公報に詳細に説明されているので、本明細書でのさらなる説明は省略する。

【0040】

図 3 は制御ユニット 60 の構成を示すブロック図である。該制御ユニット 60 はマイクロコンピュータにより構成されており、CPU からなる第 1 の演算装置 90 及び第 2 の演算装置 92、A/D 変換器 80、カウンタ 86、D/A 変換器 96、RAM 84、ROM 94、並びにこれらの間のデータ授受を行うバスライン 82 を備えている。この制御ユニット 60 では、各脚体 2 の 6 軸力センサ 50、姿勢センサ 54 (加速度センサおよびレートジャイロセンサ)、ジョイスティック 73 等の出力信号は A/D 変換器 80 でデジタル値に変換された後、バスライン 82 を介して RAM 84 に送られる。またロボット 1 の各関節のエンコーダ 65 (ロータリーエンコーダ) の出力は、カウンタ 86 を介して RAM 84 に入力される。

【0041】

前記第 1 の演算装置 90 は後述の如く目標歩容を生成すると共に、関節角変位指令 (各

関節の変位角もしくは各電動モータ 64 の回転角の指令値) を算出し、RAM 84 に送出する。また、第 2 の演算装置 92 は RAM 84 から関節角変位指令と、前記エンコーダ 65 の出力信号に基づいて検出された関節角の実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な操作量を算出して、その操作量を D/A 変換器 96 とサーボアンプ 64a とを介して各関節を駆動する電動モータ 64 に出力する。

【0042】

図 4 は、本明細書の実施形態におけるロボット 1 の制御ユニット 60 の主な機能的構成を示すブロック図である。この図 4 中の「実ロボット」の部分以外の部分が制御ユニット 60 が実行する処理機能（主として第 1 の演算装置 90 及び第 2 の演算装置 92 の機能）によって構成されるものである。その処理機能は、制御ユニット 60 に実装されたプログラム等によって実現されている。尚、以下の説明では、ロボット 1 の各部（脚体 2、腕体 5 など）の左右を特に区別する必要がないときは、前記符号 R、L を省略する。

【0043】

以下説明すると、制御ユニット 60 は、後述の如く目標歩容を自在かつリアルタイムに生成して出力する歩容生成装置 100 を備えている。この歩容生成装置 100 は、その機能によって本発明の実施形態を実現するものである。この歩容生成装置 100 が出力する目標歩容は、補正目標上体姿勢軌道（上体 3 の目標姿勢の軌道）、補正目標上体位置軌道（上体 3 の目標位置の軌道）、目標足平位置姿勢軌道（各足平 22 の目標位置及び目標姿勢の軌道）、目標腕姿勢軌道（各腕体の目標姿勢の軌道）、目標 ZMP（目標全床反力中心点）軌道、目標 ZMP まわりの補正目標床反力モーメント軌道および目標全床反力軌道から構成される。尚、脚体 2 や腕体 5 以外に、上体 3 に対して可動な部位（頭部など）を備える場合には、その可動部位の目標位置姿勢軌道が目標歩容に加えられる。

【0044】

ここで、本明細書での歩容に関する基本的な用語の定義などについて説明しておく。歩容における「軌道」は時間的変化のパターン（時系列パターン）を意味し、「軌道」の代わりに「パターン」と称することもある。また、「姿勢」は空間的な向きを意味する。例えば上体姿勢は Z 軸（鉛直軸）に対するロール方向（X 軸まわり）の上体 3 の傾斜角（姿勢角）とピッチ方向（Y 軸まわり）の上体 3 の傾斜角（姿勢角）とで表され、足平姿勢は各足平 22 に固定的に設定された 2 軸の空間的な方位角で表される。本明細書では、上体姿勢は上体姿勢角ということもある。なお、腕体 5 に関する目標腕姿勢は、本明細書の実施形態では上体 3 に対する相対姿勢で表される。

【0045】

上体位置は、上体 3 のあらかじめ定めた代表点（上体 3 に対して任意に固定設定したローカル座標系でのある固定点）の位置を意味する。同様に、足平位置は、各足平 22 のあらかじめ定めた代表点（各足平 22 に対して任意に固定設定したローカル座標系での固定点）の位置を意味する。例えば各足平 22 の代表点は、各足平 22 の底面上（より具体的には各脚体 2 の足首関節の中心から各足平 22 の底面への垂線が該底面と交わる点等）に設定される。

【0046】

上体 3 に関する前記補正目標上体姿勢および補正目標上体位置は、ある基本となる目標上体姿勢（仮目標上体姿勢）および目標上体位置（仮目標上体位置）を補正したものである。本明細書の実施形態では、基本となる目標上体位置姿勢は、後述する目標瞬時値発生部で決定される目標上体位置姿勢（後述の図 12 の S032 で決定される目標上体位置姿勢）が相当する。

【0047】

なお、以降の説明では、誤解を生じるおそれがない場合には、しばしば「目標」を省略する。

【0048】

歩容のうちの、床反力に係わる構成要素以外の構成要素、すなわち足平位置姿勢、上体位置姿勢等、ロボット 1 の各部位の位置姿勢に関する構成要素を総称的に「運動」という

。また、各足平 22 に作用する床反力（並進力及びモーメントからなる床反力）を「各足平床反力」と呼び、ロボット 1 の全て（2 つ）の足平 22 R, 22 L についての「各足平床反力」の合力を「全床反力」という。ただし、以下の説明においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、特に断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。

【0049】

目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する並進力及びモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、特に目標床反力中心点（全床反力の中心点の目標位置）を作用点にして目標床反力を表現すると、目標床反力のモーメント成分は、鉛直成分（鉛直軸（Z 軸）まわりのモーメント成分）を除いて零になる。換言すれば、目標床反力中心点まわりの目標床反力のモーメントの水平成分（水平軸（X 軸及び Y 軸）まわりのモーメント）は零になる。

【0050】

なお、動力学的平衡条件を満足する歩容では、ロボット 1 の目標運動軌道から算出される ZMP（目標運動軌道から算出される慣性力と重力との合力がその点まわりに作用するモーメントが、鉛直成分を除いて零になる点）と目標床反力中心点とは一致することから、目標床反力中心点軌道の代わりに目標 ZMP 軌道を与えても同じことである。

【0051】

ここで、ロボット 1 の歩行を行う場合には、例えば本出願人が先に特開平 10-86080 号公報で提案した上体高さ決定手法によってロボット 1 の上体 3 の鉛直位置（上体高さ）が決定されると、並進床反力鉛直成分は従属的に決定される。さらに、目標歩容の運動による慣性力と重力との合力が目標 ZMP まわりに発生するモーメントの水平成分が 0 になるようにロボット 1 の上体水平位置軌道（あるいは全体重心の位置軌道）を決定することで、並進床反力水平成分も従属的に決定される。このため、ロボット 1 の歩行を行う場合には、目標歩容の床反力に関して明示的に設定すべき物理量としては、目標 ZMP だけでもよい。

【0052】

一方、床反力が 0 もしくはほぼ 0 になるような時期を伴う歩容でのロボット 1 の移動、例えばロボット 1 の走行を行う場合には、並進床反力鉛直成分もロボット 1 の動作制御上重要である。このため、並進床反力鉛直成分の目標軌道を明示的に設定した上で、ロボット 1 の目標上体鉛直位置等の軌道を決定することが望ましい。また、ロボット 1 の歩行においても、摩擦係数が低い床面上（低ミュー路上）でロボット 1 を移動させるような場合には、並進床反力鉛直成分（より厳密には並進床反力の床面に垂直な成分）が摩擦力に影響を及ぼすことから、ロボット 1 のスリップなどを防止する上で、並進床反力鉛直成分の目標軌道を明示的に設定することが望ましい。さらに、本発明の実施形態では、最終的に歩容生成装置 100 が出力する目標歩容では、目標 ZMP まわりに補正目標床反力モーメント（水平成分が 0 とは限らないモーメント）を発生させる。

【0053】

このようなことから、本明細書の実施形態では、歩容生成装置 100 が出力する目標歩容の床反力に関する構成要素として、目標 ZMP 軌道のほか、目標 ZMP まわりの補正目標床反力モーメントと、目標並進床反力鉛直成分とを含ませている。

【0054】

そして、本明細書では、歩容生成装置 100 が出力する目標歩容は、広義には、「1 歩ないしは複数歩の期間の目標運動軌道と目標床反力軌道との組」の意味で使用され、狭義には、「1 歩の期間の目標運動軌道と、目標 ZMP、補正目標床反力モーメント及び目標並進床反力鉛直成分を含む目標床反力軌道との組」の意味で使用される。

【0055】

但し、本明細書の実施形態においては、最終的な目標歩容（歩容生成装置 100 が出力する目標歩容）を決定するまでの過程で作成する目標歩容（仮目標歩容）では、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメントの水平成分は、本来の目標 ZMP の定義どおりに 0 とさ

れる。従って、最終的に決定する目標歩容以外の仮目標歩容では、上記狭義の目標歩容から、補正目標床反力モーメントを除いたものが目標歩容の意味で使用される。補足すると、本明細書の実施形態では、最終的な目標歩容（歩容生成装置100が出力する目標歩容）を決定するまでの過程で作成する目標歩容（仮目標歩容）が本発明に密接に関連するものとなっている。このため、以降の説明で現れる目標歩容の大部分は、前記狭義の目標歩容から、補正目標床反力モーメントを除いたもの（目標ZMPを満足する歩容）の意味で使用される。

【0056】

なお、以降の説明では、「床反力鉛直成分」は「並進床反力鉛直成分」を意味するものとし、床反力のうちのモーメントの鉛直成分（鉛直軸回り成分）は、「モーメント」という用語を用いて「床反力鉛直成分」と区別をする。同様に、「床反力水平成分」は「並進床反力水平成分」を意味するものとする。

【0057】

また、目標歩容の「1歩」は、ロボット1の片方の脚体2が着地してからもう一方の脚体2が着地するまでの意味で使用する。

【0058】

また、歩容における両脚支持期とは、ロボット1がその自重を両脚体2、2で支持する期間、片脚支持期とはいずれか一方のみの脚体2でロボット1の自重を支持する期間、空中期とは両脚体2、2が床から離れている（空中に浮いている）期間を言う。片脚支持期においてロボット1の自重を支持しない側の脚体2を遊脚と呼ぶ。なお、片脚支持期と空中期とが交互に繰り返されるロボット1の走行歩容では両脚支持期は無い。この場合、空中期では両脚2、2とも、ロボット1の自重を支持しないこととなるが、便宜上、該空中期の直前の片脚支持期において遊脚であった脚体2、支持脚であった脚体2をそれぞれ該空中期においても遊脚、支持脚と呼ぶ。

【0059】

また、目標歩容の軌道は、グローバル座標系（床に固定された座標系）で記述される。グローバル座標系としては、例えば支持脚足平22の着地位置姿勢に対応して定まる支持脚座標系が用いられる。この支持脚座標系は、例えば支持脚足平22の底面のほぼ全面を床に接地した状態で、その足平22が連結された足首関節の中心から床面に延ばした垂線が床と交わる点を原点とし、その原点を通る水平面に支持脚足平22を投影したときの該足平22の前後方向をX軸方向、左右方向をY軸方向とする座標系（Z軸方向は鉛直方向）である。

【0060】

図5は、歩容生成装置100の詳細を示すブロック図である。この図5を参照して、歩容生成装置100の処理のより具体的な概要を以下に説明する。

【0061】

図示の如く、歩容生成装置100は歩容パラメータ決定部100aを備える。歩容パラメータ決定部100aは、目標歩容を規定する歩容パラメータの値あるいは時系列テーブルを決定する。

【0062】

本明細書の実施形態では、歩容パラメータ決定部100aが決定する歩容パラメータには、目標歩容のうちの、目標足平位置姿勢軌道、目標腕姿勢軌道、目標ZMP軌道、および目標床反力鉛直成分軌道をそれぞれ規定するパラメータが含まれる。

【0063】

ここで、歩容生成装置100が目標歩容を生成するとき、遊脚足平22の着地予定位置姿勢、着地予定時刻、あるいは歩幅、移動速度等の歩容生成用の基本的な要求値（要求パラメータ）が、前記ジョイスティック73、もしくは図示しない行動計画部（ロボット1の行動計画を作成する装置）などの装置から歩容生成装置100に与えられる。あるいは、上記要求パラメータをあらかじめ記憶保持した記憶媒体から該要求パラメータを歩容生成装置100が読み込む。そして、歩容生成装置100の歩容パラメータ決定部100a

は、その要求パラメータに応じて歩容パラメータを決定する。

【0064】

また、本明細書の実施形態では、歩容パラメータ決定部100aが決定する歩容パラメータには、基準上体姿勢軌道、ZMP許容範囲、床反力水平成分許容範囲をそれぞれ規定するパラメータも含まれる。

【0065】

ここで、前記基準上体姿勢軌道は、最終的に歩容生成装置100が出力するものではないが、目標歩容を決定するときに参酌されるものである。この基準上体姿勢軌道は、ロボット1の上体姿勢に関して、前記ジョイスティック73あるいは行動計画部から与えられ、もしくはあらかじめ定められた要求（上体姿勢を鉛直姿勢に保つなどの要求）にそのまま従って生成される上体姿勢軌道である。目標上体姿勢（以降、「基準」が付いていない「上体姿勢」は、目標上体姿勢を表す）は、基準上体姿勢に長期的に追従するか、または一致するように生成される。

【0066】

また、前記ZMP許容範囲に関して補足すると、本明細書の実施形態では、目標歩容は、目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメント（これは一般には0ではない）を発生するように修正される。したがって、目標ZMPは、本来の定義（床反力モーメント水平成分が0である点という定義）とは異なる点となり、本来の定義を満足するZMP（以下、真のZMPという）は、補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で割った値だけ目標ZMPからずれた位置に移る。

【0067】

修正された歩容（歩容生成装置100が最終的に出力する目標歩容）の真のZMPは、少なくともZMP存在可能範囲（いわゆる支持多角形のこと。床と足平22の底面との間に粘着力が作用しないと仮定した場合における床反力作用点（ZMP）の存在可能範囲）内になければならない。さらにロボット1の安定余裕を十分にとるためには、修正された歩容の真のZMPは、ZMP存在可能範囲のなかの中心付近の範囲にあることが望ましい。そこで、本明細書の実施形態では修正された歩容の真のZMPが存在できる許容範囲を設定する。この範囲をZMP許容範囲と呼ぶ。ZMP許容範囲は、ZMP存在可能範囲と一致あるいはZMP存在可能範囲内に包含されるように設定される。

【0068】

なお、前記したように、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で除算したものが、目標ZMPに対する真のZMPの位置のずれ量を表すので、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを設定する代わりに、目標ZMPに対する真のZMPの位置のずれ量（補正目標床反力モーメントのZMP換算値）を設定してもよい。また、ZMP許容範囲は、その境界の位置に目標床反力鉛直成分を乗算することで、補正目標床反力モーメント許容範囲に変換することができ、その補正目標床反力モーメント許容範囲をZMP許容範囲の代わりに設定するようにしてもよい。

【0069】

また、前記床反力水平成分許容範囲は、ロボット1の足平22の床との接地面に、足平22が滑らないような大きさの摩擦力を発生させ得る床反力水平成分の許容範囲である。本明細書の実施形態では、少なくとも最終的に歩容生成装置100が出力する目標歩容の運動（目標運動）は、それによって発生するロボット1の慣性力の水平成分に釣り合う床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に収まるように生成される。

【0070】

なお、本明細書の実施形態で設定する床反力水平成分許容範囲は、後述のS022の処理で設定される定常歩容用のものと、S026の処理で設定される基本歩容用のものと、S030で設定される歩容補正用（フルモデル補正用）のものがある。ただし、これらの床反力水平成分許容範囲は必ずしも互いに異なる必要はなく、同一でもよい。一方、ZMP許容範囲は、S030処理で設定される歩容補正用（フルモデル補正用）のものだけである。

【0071】

歩容パラメータ決定部100aで決定された歩容パラメータは目標瞬時値発生部100bに入力される。目標瞬時値発生部100bは入力された歩容パラメータに基づき、動力学モデルを用いて目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢、目標ZMP、目標床反力鉛直成分、ZMP許容範囲、床反力水平成分許容範囲等、目標歩容の構成要素の瞬時値（前記制御ユニット60の所定の制御処理周期毎の値）を逐次算出（発生）する。この目標瞬時値発生部100bの処理は、本発明の中核に係わる処理を担うものである。なお、図5では一部の目標瞬時値のみを代表的に記載している。

【0072】

目標瞬時値発生部100bで算出された目標瞬時値は、フルモデル補正部100cに入力される。このフルモデル補正部100cは、目標瞬時値発生部100bが求めた目標上体位置姿勢を、動力学的精度の高い動力学モデルとしてのフルモデルを用いて補正してなる補正目標上体位置姿勢を算出すると共に、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分の目標値である補正目標床反力モーメントを算出する。

【0073】

フルモデル補正部100cは、より一般的には、次のD1～D3の条件を満足するように、E1あるいはE2の処理を実行する。すなわち、フルモデル補正部100cは、
D1) 目標瞬時値発生部100bで生成した歩容よりも高い精度で動力学的平衡条件を満足する。

D2) 真のZMP（目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメントを発生させることによって修正された本来の定義を満足するZMP）は、ZMP許容範囲（安定余裕が十分維持できる許容範囲）に存在する。

D3) 床反力水平成分は床反力水平成分許容範囲内になる。

という条件を満足するように、

E1) 目標瞬時値発生部100bで生成した歩容の上体位置姿勢を補正する。

あるいは

E2) 目標瞬時値発生部100bで生成した歩容の上体位置姿勢を補正すると共に、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを出力する（目標床反力を補正する）。

【0074】

本明細書の実施形態では、D1～D3の条件を満足するように、E2の処理が実行される。なお、本明細書の実施形態におけるフルモデル補正部100cの処理は、例えば本願出願人が先に提案したPCT国際公開公報WO/03/057427/A1にて詳細に説明されているもの（具体的には、同公報の図13のS038の処理）と同じである。従って、本明細書でのフルモデル補正部100cの処理の詳細な説明は省略する。

【0075】

また、本明細書の実施形態では、フルモデル補正部100cによる補正を行うが、その補正を省略し、目標瞬時値発生部100bで決定した目標歩容の瞬時値をそのまま歩容生成装置100から出力するようにしてもよい。

【0076】

図4に戻って、上述のように決定される補正目標上体位置姿勢、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメント、目標足平位置姿勢の瞬時値を含む目標歩容の瞬時値は、複合コンプライアンス制御装置101（図4で破線で囲んだ部分）に入力される。この複合コンプライアンス制御装置101では、ロボット1のバランスを保ちつつ、目標歩容に追従するように関節アクチュエータ（電動モータ64）が制御される。なお、複合コンプライアンス制御装置101のより具体的な処理は後述する。

【0077】

以上が歩容生成装置100の概要である。なお、以上説明した歩容生成装置100の概要は、本明細書のいずれの実施形態においても同じである。

【0078】

次に、本発明の第1実施形態を具体的に説明していく。第1実施形態では、目標瞬時値

発生部 100b は、前記制御ユニット 60 の制御処理周期毎に、複数の動力学モデルを用いて、目標 ZMP 軌道を段階的に修正しつつ目標歩容の瞬時値を決定する。

【0079】

ここで、第 1 実施形態で歩容生成に用いられる上体運動モードと動力学モデルとについて説明する。

【0080】

走行など、空中期がある歩容や、低摩擦床面での歩行においては、単に上体水平加速度を調整するだけでは、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学平衡条件を満足することができない場合がある。そこで、本実施形態では、以下に説明する上体 3 の 2 つの運動モード（上体並進モード及び上体回転モード）を複合的に発生させることにより、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学平衡条件を満足するようにしている。

【0081】

図 6 (a) のように、ある運動状態から、上体水平加速度だけを摂動させると、全体重心水平加速度と全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、上体水平加速度の摂動は、（それによって発生する慣性力と重力の合力に対して動学的に釣り合う）床反力鉛直成分を摂動させずに、目標 ZMP まわりの床反力モーメント（ただし鉛直軸まわり成分を除く）と床反力水平成分（厳密には、並進床反力水平成分）とを摂動させる。この運動モードを上体並進モードと呼ぶ。

【0082】

言いかえると、床反力鉛直成分を変化させずに、目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分と床反力水平成分（並進床反力水平成分）を変化させる運動を上体並進モードと呼ぶ。

【0083】

この時の単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を ΔM_p 、単位加速度当たりの床反力水平成分の変化を ΔF_p とする。図 6 (a) に示す状況で上体 3 を前方に水平加速すると、 ΔM_p と ΔF_p は図 6 (a) に示す矢印の向きに作用する。

【0084】

感覚的に判り易くするために、運動によって発生する慣性力と重力の合力に釣り合う床反力を用いて表現したが、慣性力と重力の合力を用いて表現した方が、理論的には的確である。なお、上記合力と床反力は、互いに大きさが同じで向きが逆になっている。

【0085】

一方、図 6 (b) のように、ある運動状態から、ある点 P_r まわりに上体姿勢角加速度を摂動させると、全体重心は摂動せずに、全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、点 P_r まわりの上体姿勢角加速度摂動は、床反力鉛直成分と床反力水平成分（厳密には、並進床反力鉛直成分と並進床反力水平成分）を摂動させずに、目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分を摂動させる。この運動モードを上体回転モードと呼ぶ。

【0086】

言いかえると、床反力鉛直成分と床反力水平成分を変化させずに、目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分を変化させる運動を上体回転モードと呼ぶ。

【0087】

この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を ΔM_r 、単位角加速度当たりの床反力の水平成分の変化を ΔF_r とする。 ΔF_r は零である。図 6 (b) に示す状況で上体が前傾するように角加速度を与えると、 ΔM_r は図 6 (b) に示す矢印の向きに作用する。

【0088】

上体 3 の運動には、上体並進モードと上体回転モード以外に、上体鉛直移動モードがある。これは、上体 3 を鉛直方向に移動させる運動である。

【0089】

第 1 実施形態においては、目標瞬時値発生部 100b は、以下に示す複数の動力学モデル

ルを用いて歩容を生成する。本実施形態では、その複数の動力学モデルとして、例えば第1～第3の3個の動力学モデルが用いられる。

【0090】

図7に第1動力学モデルの例を示す。この第1動力学モデルは、上体3に対応する上体質点を有する倒立振子と、各足平22に対応する足平質点とで構成されたモデルであり、上体質点の水平運動が前記上体並進モードに対応している。この第1動力学モデルは、本願出願人が先に例えば特開2002-542574号公報もしくはPCT国際公開公報WO/02/040224に例示した動力学モデルである。従って、本明細書での詳細な説明は省略するが、第1動力学モデルの動力学は、次のように変数を定義したとき、式1a～1dにより表される。

msup1: 支持脚足平質点の質量、mswg1: 遊脚足平質点の質量、mb1: 上体質点の質量、mtotal: ロボット1の全体質量(=msup1+mswg1+mb1)、mfeet: 両脚質量(=msup1+mswg1)、xsup: 支持脚足平質点の位置、xswg: 遊脚足平質点の位置、xb: 上体質点の位置、h: 倒立振子の高さ(倒立振子の支点から上体質点までの高さ)、g: 重力加速度定数、G: X、Y座標成分が0で、Z座標成分が-gである重力加速度ベクトル。なお、本明細書において、任意の変数Xに対して d^2X/dt^2 は、Xの2階微分値を意味するものとする。

【0091】

点Pまわりの脚総慣性力モーメント

$$=msup1 * (xsup1 - xp) * G - msup1 * (xsup1 - xp) * d^2xsup1/dt^2 + mswg1 * (xswg1 - xp) * G - mswg1 * (xswg1 - xp) * d^2xswg1/dt^2 \quad \dots \text{式 1 a}$$

$$\text{点Pまわりの脚総慣性力モーメント} = mfeet * (ZMPfeet - xp) * G \quad \dots \text{式 1 b}$$

$$ZMPpend = mtotal / mb * \text{目標ZMP} - mfeet / mb * ZMPfeet \quad \dots \text{式 1 c}$$

$$d^2xb/dt^2 \text{の水平成分} = g / h * (xb \text{の水平成分} - ZMPpend \text{の水平成分}) \quad \dots \text{式 1 d}$$

ここで、ZMPpendは上体質点のZMPであり、倒立振子の支点の位置である。また、ZMPfeetは両脚体2、2(両足平質点)の運動によって発生する慣性力と重力との合力(総慣性力)がある点Pのまわりに発生するモーメント(脚総慣性力モーメント)に擬似的に対応させたZMP(脚総慣性力モーメントのZMP換算値。以下、脚ZMPという)であり、その点Pの位置がxpである。この場合、点Pは、第1の動力学モデルの近似精度ができるだけ高くなるように設定される。補足すると、第1動力学モデルでは、全体質量mtotalに対する両脚質量mfeetの比率を0に近づけると、さらに線形性の高い単純倒立振子となる。

【0092】

図8は第1動力学モデルを用いた上体位置姿勢の算出処理を示すブロック図である。第1動力学モデルでは、目標足平位置姿勢、目標ZMPおよび目標上体姿勢から、同図のブロック図に従って演算を行うことで目標上体位置姿勢が算出される。ここで、同ブロック図中の脚ZMP算出器200は、前記式1a、1bとを基にZMPfeetを算出するものであり、線形倒立振子201は、前記式1dを基に、 d^2xb/dt^2 の水平成分を求め、さらに、それを2階積分することで、上体質点の水平位置xbを求めるものである。また、上体位置姿勢決定器202は、目標上体姿勢と上体質点の水平位置xbとから目標上体位置姿勢を決定するものである。この場合、上体位置姿勢決定器202が出力する目標上体姿勢は、入力される目標上体姿勢と同一である。従って、上体位置姿勢決定器202は実質的には、目標上体位置を決定するものである。

【0093】

図9に、第2動力学モデルの例を示す。図示の如く、この第2動力学モデルはロボット1の各脚体2にそれぞれ対応する2つの質点(足平質点)2m、2m、及び上体3に対応する質点(上体質点)24mからなる合計3質点と、イナーシャがあって質量のないフライホイールFHとから構成されるモデルである。この第2動力学モデルは、本願出願人が例えば先に提案したPCT国際公開公報WO/03/057427/A1に例示した動力

学モデルである。従って、本明細書での詳細な説明は省略するが、第2動力学モデルの動力学は、次のように変数を定義したとき、式2 a～2 cにより表される。なお、ここでは、本明細書の理解を容易にするために、サジタルプレーン（前後軸（X軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式のみを記述し、ラテラルプレーン（左右軸（Y軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式を省略する。

Zsup2: 支持脚質点鉛直位置、Zswg2: 遊脚質点鉛直位置、Zb2: 上体質点鉛直位置、ZGtotal2: 全体重心鉛直位置、Xsup2: 支持脚質点水平位置、Xswg2: 遊脚質点水平位置、Xb2: 上体質点水平位置、XGtotal2: 全体重心水平位置、 θ by2: 鉛直方向に対するY軸回りの上体姿勢角（傾斜角）、mb2: 上体質点質量、msup2: 支持脚質点質量、mswg2: 遊脚質点質量、mtotal: ロボット総質量（=mb2+msup2+mswg2）、J: 上体慣性モーメント（上体回転モードにおける等価慣性モーメント）、Fx: 床反力水平成分（詳しくは並進床反力の前後方向（X軸）成分）、Fz: 床反力鉛直成分（詳しくは並進床反力の鉛直方向（Z軸）成分）、My: 目標ZMPまわりの床反力モーメント（詳しくは床反力モーメントの左右軸（Y軸）まわり成分）。

$$F_z = mb2 * (g + d2Zb2/dt2) + msup2 * (g + d2Zsup2/dt2) + mswg2 * (g + d2Zswg2/dt2) \quad \dots\dots \text{式 2 a}$$

$$F_x = mb2 * d2Xb/dt2 + msup2 * d2Xsup2/dt2 + mswg2 * d2Xswg2/dt2 \quad \dots\dots \text{式 2 b}$$

$$\begin{aligned} My = & -mb2 * (Xb2 - Xzmp) + (g + d2Zb2/dt2) + mb2 * (Zb2 - Zzmp) * d2Xb2/dt2 \\ & - msup2 * (Xsup2 - Xzmp) * (g + d2Zsup2/dt2) \\ & + msup2 * (Zsup2 - Zzmp) * d2Xsup2/dt2 \\ & - mswg2 * (Xswg2 - Xzmp) * (g + d2Zswg2/dt2) \\ & + mswg2 * (Zswg2 - Zzmp) * (d2Xswg2/dt2) + J * d2\theta by/dt2 \end{aligned} \quad \dots\dots \text{式 2 c}$$

なお、ロボット全体重心位置には次の関係式が成立する。

$$ZGtotal2 = (mb2 * Zb2 + msup2 * Zsup2 + mswg2 * Zswg2) / mtotal \quad \dots\dots \text{式 2 d}$$

$$XGtotal2 = (mb2 * Xb2 + msup2 * Xsup2 + mswg2 * Xswg2) / mtotal \quad \dots\dots \text{式 2 e}$$

この第2動力学モデルでは、脚体2、2の動力学（各質点2 m、2 mの動力学）と上体3の動力学（質点2 4 m及びフライホイールFHの動力学）とが相互に非干渉に構成されると共に、ロボット1全体の動力学は、それらの線形結合で表される。また、さらに、上体3の運動と床反力との関係は、上体3の並進運動（上体並進モード）と床反力との関係、並びに上体3の回転運動（上体回転モード）と床反力との関係に分離される。具体的には、上体質点2 4 mの水平運動によって発生する床反力は、上体3の水平方向並進運動（上体並進モード）によって発生する床反力に対応し、フライホイールの回転運動によって発生する床反力は、上体3の姿勢角の回転運動（上体回転モード）によって発生する床反力に対応する。

【0094】

尚、ロボット1の腕体の質量は上体質点2 4 mに含まれるものとし、上体質点2 4 mは腕体の質量を含む質量をもつ。本実施形態では、目標歩容における腕体の運動（腕振り運動）は、後述するように、ロボット1の腕振り以外の運動によってロボット1に発生する鉛直軸まわりの慣性力のモーメントを打ち消しつつも、上体3に対する両腕体の全体の重心の相対位置が動かないように行なわれるので、腕体の腕振り運動による（鉛直軸まわり成分を除く）床反力モーメントへの影響と床反力水平成分への影響とは無視する。

【0095】

図10に第3動力学モデルを例示する。同図に示す如く、第3動力学モデルは、上体3、各足平2 2、各脚体2の膝関節の近傍部分（大腿リンクの膝関節寄りの部分）にそれぞれ対応する質点を有すると共に、上体3に上体質点の回りにイナーシャ（慣性モーメント）Ibをもつモデルである。この第3動力学モデルでは、動力学方程式は省略するが、ロボット1の運動と床反力との関係は、前記第2動力学モデルと同様に、各質点の並進運

動および上体 3 の姿勢変化運動と、床反力（並進床反力および目標 ZMP 回りの床反力モーメント）との関係として記述される。

【0096】

前記第 1 ～ 第 3 動力学モデルは、その順番で、動力学的な精度が高いものとなっている。

【0097】

なお、前記フルモデル補正部 100c で用いるフルモデルは、例えば図 11 に示す如く、ロボット 1 の各リンクに質点をもつような多質点モデルである。この場合、ロボット 1 の各リンクは、それに対応する質点の回りにイナーシャをもつようなものであってもよい。

【0098】

次に、本発明の第 1 実施形態に関して、歩容生成装置 100 の処理の詳細をより具体的に説明する。

【0099】

本実施形態における歩容生成装置 100 は、ロボット 1 の片方の脚体 2 が着地してから他方の脚体 2 が着地するまでの 1 歩分の目標歩容（前記狭義の目標歩容）を単位として、その 1 歩分の目標歩容を順番に生成する。ここで、新たに生成しようとしている目標歩容を「今回歩容」、その次の目標歩容を「次回歩容」、さらにその次の目標歩容を「次次回歩容」、というように呼ぶ。また、「今回歩容」の一つ前に生成した目標歩容を「前回歩容」と呼ぶ。

【0100】

また、歩容生成装置 100 が今回歩容を新たに生成するとき、該歩容生成装置 100 には、ロボット 1 の 2 歩先までの遊脚側足平 22 の着地予定位置姿勢、着地予定時刻の要求値（要求）が歩容に対する要求パラメータとして入力される（あるいは歩容生成装置 100 が記憶装置から要求パラメータを読み込む）。そして、歩容生成装置 100 は、これらの要求パラメータを基に、補正目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標 ZMP 軌道、目標床反力鉛直成分軌道、目標腕姿勢軌道、補正目標床反力モーメント軌道等を生成する。

【0101】

以下に歩容生成装置 100 の歩容生成処理の詳細を図 12 ～ 図 27 を参照しつつ説明する。図 12 は、その歩容生成装置 100 が実行する歩容生成処理のメインルーチンを示すフローチャート（構造化フローチャート）である。なお、このメインルーチン処理の手順自体は、その一部のサブルーチン処理を除いて、例えば本願出願人による前記 PCT 国際公開公報 WO/03/057427/A1（以下、公報文献 1 という）と同じである。

【0102】

まず S010 において時刻 t を 0 に初期化するなど種々の初期化作業が行なわれる。この処理は、歩容生成装置 100 の起動時等に行なわれる。次いで、S012 を経て S014 に進み、歩容生成装置 100 は、制御周期（図 12 のフローチャートの演算処理周期）毎のタイマ割り込みを待つ。制御周期は Δt である。

【0103】

次いで、S016 に進み、歩容の切り替わり目であるか否かが判断され、歩容の切り替わり目であるときは S018 に進むと共に、切り替わり目でないときは S030 に進む。ここで、上記「歩容の切り替わり目」は、前回歩容の生成が完了し、今回歩容の生成を開始するタイミングを意味し、例えば前回歩容の生成を完了した制御周期の次の制御周期が歩容の切り替わり目になる。

【0104】

S018 に進むときは時刻 t が 0 に初期化され、次いで S020 に進み、次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期が読み込まれる。これらの支持脚座標系及び歩容周期は、前記要求パラメータにより定まるものである。すなわち、本実施形態では、歩容生成装置 100 にジョイスティック 44 等から与えられる要

求パラメータは、2 歩先までの遊脚側足平 2 2 の着地予 positioning 姿勢（足平 2 2 が着地してから足底を床面にほぼ全面的に接触させるように、滑らさずに回転させた状態での足平位置姿勢）、着地予定時刻の要求値を含んでおり、その 1 歩目の要求値、2 歩目の要求値がそれぞれ、今回歩容、次回歩容に対応するものとして、今回歩容の生成開始時（前記 S 0 1 6 の歩容の切り替わり目）以前に歩容生成装置 1 0 0 に与えられたものである。なお、これらの要求値は今回歩容の生成途中でも変更することは可能である。

【0 1 0 5】

そして、上記要求パラメータにおける 1 歩目の遊脚側足平 2 2（今回歩容での遊脚側足平 2 2）の着地予 positioning 姿勢の要求値に対応して次回歩容支持脚座標系が定まる。また、2 歩目の遊脚側足平 2 2 の着地予 positioning 姿勢の要求値に応じて次々回歩容支持脚座標系が定まる。また、今回歩容周期は、今回歩容の支持脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）から、1 歩目（今回歩容）の遊脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まり、次回歩容周期は、1 歩目の遊脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）から 2 歩目の遊脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まる。

【0 1 0 6】

この S 0 2 0 の処理は、前記公報文献 1 の図 1 3 の S 0 2 0 の処理と同一であり、本明細書での説明は以上に留める。

【0 1 0 7】

次いで S 0 2 2 に進み、歩容生成装置 1 0 0 は、今回歩容に続く仮想的な周期的歩容としての定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。該歩容パラメータは、定常旋回歩容における目標足平位置姿勢軌道を規定する足平軌道パラメータ、基準とする上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータ、目標腕姿勢軌道を規定する腕軌道パラメータ、目標 ZMP 軌道を規定する ZMP 軌道パラメータ、目標床反力鉛直成分軌道を規定する床反力鉛直成分軌道パラメータを含む。さらに、目標床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータも歩容パラメータに含まれる。

【0 1 0 8】

尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界（本実施形態では 1 歩毎の歩容の境界）においてロボット 1 の運動状態（足平位置姿勢、上体位置姿勢等の状態）に不連続が生じないような周期的歩容を意味するものとして使用する。以降、「定常旋回歩容」を「定常歩容」と略す場合もある。

【0 1 0 9】

定常旋回歩容の詳細は、前記公報文献 1 や特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号などにて説明されているので、本明細書での詳細な説明は省略するが、その概要は次の通りである。

【0 1 1 0】

周期的歩容である定常旋回歩容は、本実施形態では、ロボット 1 の 2 歩分の歩容、すなわち今回歩容に続く第 1 旋回歩容と該第 1 旋回歩容に続く第 2 旋回歩容とからなる歩容を該定常旋回歩容の 1 周期分の歩容として、その 1 周期分の歩容を繰り返す歩容である。ここで「旋回」なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。また、生成する今回歩容が例えばロボット 1 の走行を行う走行歩容（片脚支持期と空中期とを有する歩容）であるときには、定常旋回歩容の第 1 旋回歩容及び第 2 旋回歩容も走行歩容であり、ロボット 1 の歩行を行う歩行歩容（片脚支持期と両脚支持期とを有する歩容）であるときには、定常旋回歩容の第 1 旋回歩容及び第 2 旋回歩容も歩行歩容である。つまり、第 1 旋回歩容及び第 2 旋回歩容の基本的な歩容形態は今回歩容と同一である。

【0 1 1 1】

なお、以降の説明では、特にことわらない限り、生成する歩容として走行歩容を例にとって説明する。

【0 1 1 2】

定常旋回歩容は、歩容生成装置 1 0 0 で今回歩容の終端における発散成分や上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度等のロボット 1 の運動状態を決定するために暫定的に

作成されるものであり、歩容生成装置 100 からそのまま出力されるものではない。

【0113】

尚、「発散」とは、ロボット 1 の上体 3 の位置が両足平 22, 22 の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。発散成分の値とは、ロボット 1 の上体 3 の位置が両足平 22, 22 の位置（より具体的には、支持脚側足平 22 の接地面に設定されたグローバル座標系（支持脚座標系）の原点）からかけ離れていく具合を表す数値である。例えば、本明細書の実施形態では、発散成分は、前記した各動力学モデルに対して、次式により求められる。

【0114】

発散成分 = 上体質点水平位置 + 上体質点水平速度 / $\omega 0$ …式 3

この式 3 の $\omega 0$ は所定の値である。

【0115】

本明細書の実施形態では、目標歩容が前記発散を生じることなく、継続的に生成されるように、発散成分を指標にして歩容（今回歩容）を生成するようにした。すなわち、これから生成しようとする今回歩容の後に続く定常歩容が前記今回歩容に係わる要求パラメータに応じて設定され、定常歩容の初期発散成分を求めてから、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させる（より一般的には、今回歩容を定常歩容に連続させ、もしくは近づける）ように、今回歩容を生成する。

【0116】

本題に戻り、S022 では、図 13 に示すサブルーチン処理のフローチャートに従って、定常歩容の歩容パラメータが決定される。決定する歩容パラメータとしては、定常歩容の足平位置姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、腕姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、床反力水平成分許容範囲、ZMP 軌道を規定するパラメータがある。この処理は、前記公報文献 1 の図 15 のフローチャートの処理と同一であるので、ここでの説明は省略する。

【0117】

補足すると、図 13 の S112 で設定（再定義）する定常歩容の初期時刻 T_s は、第 1 旋回歩容の空中期（目標床反力鉛直成分が 0 となる時期）の開始直前の時刻であり、一步の期間 T_{cyc} は、定常歩容の第 1 旋回歩容と第 2 旋回歩容との合計時間の期間である。定常歩容は、その周期性によって、任意の時刻 T_x における状態（ロボット 1 の各部位の位置姿勢やその変化速度の状態）は時刻 $T_x + T_{cyc}$ における状態と同一になる歩容である。

【0118】

次いで、S024 に進み、定常歩容の初期状態が算出される。ここで算出される初期状態は、定常歩容の初期上体水平位置速度（水平方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期上体鉛直位置速度（鉛直方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期発散成分、初期上体姿勢角およびその角速度である。この初期状態の算出は、図 14 のサブルーチン処理のフローチャートに従って、前記第 1 ～ 第 3 動力学モデルを順次使用する段階的な探索処理により行なわれる。

【0119】

図 14 に示すとおり、S200-1、S200-2、……、S200-n（第 1 実施形態では $n=3$ ）、S204、S222、S224 の処理が順次実行され、最終的に第 n モデル（第 n 動力学モデル）上で、定常歩容の境界条件（定常歩容の初期時刻 T_s での状態と、1 周期後の時刻 $T_s + T_{cyc}$ での状態とが一致もしくはほぼ一致するという条件）を満たすように、定常歩容の初期状態が決定される。補足すると、図 14 中の「第 1 モデル」、「第 2 モデル」、……、「第 n モデル」は、第 1 動力学モデル、第 2 動力学モデル、……、第 n 動力学モデルのことである。以降、この明細書では、一般的に第 k 動力学モデル（ $k=1, 2, \dots, n$ ）を単に第 k モデルということがある。第 1 実施形態では、 $n=3$ である。また、図 14 のフローチャートの処理中で求める上体傾斜復元モーメント ZMP 換算値ピーク値 $ZMP_{precpeak}$ は、ロボット 1 の片脚支持期（より詳しくは、片脚支持期の

開始直後から終了直前までの時期。以下、上体傾斜角復元期間ということがある)で上体姿勢を基準上体姿勢に近づけるために必要な床反力モーメントのZMP換算値(基準となる目標ZMPからのずれ量)のピーク値を示すものであり、その例を図示したものが図25である。

【0120】

図14の処理の概要を説明すると、まず、定常歩容の境界条件を第1動力学モデル上で満たすように定常歩容の初期状態が探索的に決定される。そして、この第1動力学モデルを用いて決定した定常歩容の初期状態を、新たに探索初期値として用い、定常歩容の境界条件を第2動力学モデル上で満たすように定常歩容の初期状態が改めて探索的に決定される。さらに、この第2動力学モデルを用いて決定した定常歩容の初期状態を、探索処理初期値として用い、定常歩容の境界条件を第3動力学モデル上で満たすように定常歩容の初期状態が改めて探索的に決定される。より一般化して言えば、動力学モデルの個数を n としたとき、第 $k-1$ 動力学モデル($k: 2$ 以上の整数)を用いて決定した定常歩容の初期状態を、探索初期値として用い、定常歩容の境界条件を第 k 動力学モデル上で満たすように定常歩容の初期状態が探索的に決定する、という処理を繰り返す。そして、最終的に、第 n 動力学モデルを用いて決定した定常歩容の初期状態が、求めるべき初期状態として得られる。

【0121】

S200-1の処理は、より詳しくは、図15のフローチャートに示す如く実行される。それを概略的に説明すれば、第1モデル(第1動力学モデル)上での初期(時刻 T_s)上体水平位置姿勢、初期上体水平速度、初期上体姿勢角速度、上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値の候補を探索対象として、これらの探索対象を含む定常歩容の初期状態を仮決めし、この初期状態から、第1動力学モデルを用いて定常歩容の終端(時刻 $T_s + T_{cyc}$)までの歩容を生成する。そして、その生成した定常歩容が境界条件(初期と終端での状態(本実施形態では上体水平位置、上体水平速度、上体姿勢角、上体姿勢角速度)がほぼ一致すること)を満たしているか否かを判断し、満たしていない場合には、探索対象の値を変更する。これを繰り返すことで、最終的に第1モデル上で定常歩容の境界条件を満たすことができる初期状態が決定される。なお、本実施形態では、第1モデルを用いる定常歩容の初期状態の探索処理では、上記探索対象の初期値は、基本的には任意でよいが、例えば前回歩容の作成時に決定した定常歩容の初期状態などを基に決定してもよい。また、定常歩容の初期(時刻 T_s)の上体姿勢角は、S022で決定した基準上体姿勢に関する歩容パラメータから決定され、時刻 T_s での基準上体姿勢が定常歩容の初期(時刻 T_s)上体姿勢として決定される。また、定常歩容の初期(時刻 T_s)の足平位置姿勢は、S022で決定した足平位置姿勢に関する歩容パラメータから、時刻 T_s での足平位置姿勢を有限時間整定フィルタを用いて算出することで決定される。有限時間整定フィルタは、例えば前記公報文献1等にて説明されているので、ここでの説明は省略する。また、定常歩容の初期(時刻 T_s)の腕姿勢は、S022で決定した腕姿勢に関する歩容パラメータから、時刻 T_s での腕姿勢を算出することで決定される。また、定常歩容の初期(時刻 T_s)の上体鉛直位置および上体鉛直速度は、ロボット1の全体重心の鉛直方向の慣性力と重力との合力が目標床反力鉛直成分に釣り合い、且つ、全体重心の鉛直位置が定常歩容の境界条件を満たすように決定される。

【0122】

補足すると、図15の処理の基本的な考え方(手法)は、前記公報文献1の図20の処理と同様である。但し、本明細書の実施形態では、上記探索対象として、上体姿勢角速度と上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値とが含まれ、この点は、前記公報文献1の図20の処理と相違している。また、S258の処理の細部の処理(サブルーチン処理)の一部も前記公報文献1のものと相違している。

【0123】

図15の処理のうちのS258の処理は、図17のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行され、さらに、この図17のS304の処理は、図18のフローチャート

で示すサブルーチン処理により実行される。さらに、図18のS412の処理は、図19のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。これらの処理については後述する。

【0124】

また、図14のS200-2、……、S200-nの処理は、いずれも図16のフローチャートに示す如く実行される。この処理は、S1202で設定する探索対象の初期値と、S1208およびS1216で用いる動力学モデルとが図15の処理と相違し、これ以外は、図15の処理と同一である。なお、図16では、「n」は、2以上の整数を一般的に表しており、第1実施形態では、2又は3である。

【0125】

S1202では、第nモデル（第n動力学モデル）上での初期（時刻Ts）上体水平位置姿勢、初期上体水平速度、初期上体姿勢角速度、上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値からなる探索対象の初期値（初期候補値）として、第mモデル（ $m=n-1$ ）を用いて先に求めた探索対象の値（S200-mで求めた値）を設定する。そして、S1208およびS1216の処理では、第nモデルを用いて定常歩容が作成される。

【0126】

なお、図16の処理のうちのS1208の処理は、図15のS258と同様、図17のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行され、さらに、この図17のS304の処理は、図18のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。さらに、図18のS412の処理は、図19のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。以下、図17～図19の処理を説明する。

【0127】

図17の処理は、図示の通り、図15または図16の処理で仮決めした初期（時刻Ts）状態から、時刻Ts+Tcycまで（終端状態まで）の定常歩容の瞬時値を時系列的に実際に作成する処理である。また、この図17のS304のサブルーチン処理である図18の処理では、S400～S410の処理によって、S022で求めた定常歩容のパラメータを基に、目標床反力鉛直成分、目標ZMP、目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢、目標上体鉛直位置、床反力水平成分許容範囲の瞬時値が求められる。さらに、S412の処理によって、第nモデル（nは、S200-1の処理の中では「1」、S200-2の処理の中では「2」、……、S200-nの処理の中では「n」。このことは、後述の図19においても同じ）を用いて、図中に記載された条件を満たすように上体水平加速度および上体姿勢角加速度の瞬時値が決定される。そして、S414の処理によって、上体水平加速度および上体姿勢角加速度をそれぞれ2階積分して、上体水平位置および上体姿勢角の瞬時値が決定される。

【0128】

補足すると、図18の処理の基本的な考え方（手法）は、前記公報文献1の図22の処理と同様である。但し、S412のサブルーチン処理の一部は公報文献1のものと相違している。

【0129】

図18のS412のサブルーチン処理である図19の処理では、定常歩容の瞬時値を作成しようとしている現在時刻k（作成中の定常歩容内での時刻）が前記上体傾斜角復元期間内の時刻でないとき（現在時刻kが、片脚支持期の終了直前から次の片脚支持期の開始直後までの期間（目標床反力鉛直成分が0であるかもしくは0に近い期間）にあるとき）には、S504～S516の処理によって、第nモデル上で、目標ZMPを満足し、且つ、全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分が時刻kの床反力水平成分許容範囲の瞬時値内に収まるように、上体並進モードの上体水平加速度 α と、上体回転モードの上体角加速度 β （上体姿勢角の角加速度）とが決定される。

【0130】

補足すると、第1実施形態では、第1動力学モデルは、上体回転モードを考慮していないので、S200-1の処理の中で、図19のS504～S516の処理を行うときには

、床反力水平成分許容範囲は、前記図18のS410で決定したものによらずに、常に、強制的に無限大の範囲とするか、もしくは、床反力水平成分が確実に許容範囲内に収まるように十分に大きい範囲に定める（この場合、S516の処理によって、 $\alpha = \alpha_{tmp}$ 、 $\beta = 0$ となる）。あるいは、S200-1の処理の中での図18のS410において、床反力水平成分許容範囲が上記のように決定される。

【0131】

なお、第1実施形態において第2モデルあるいは第3モデルを使用するS200-2またはS200-3の中で設定する床反力水平成分許容範囲は基本的には同じでよいが、異なる範囲に設定してもよい。この場合、第3モデルは第2モデルよりも動力学的精度が高いので、例えばS200-3の中で設定する床反力水平成分許容範囲を、S200-2の中で設定する床反力水平成分許容範囲よりも、床面の実際の摩擦力の範囲により近いものに設定してもよい。

【0132】

また、現在時刻k（作成中の定常歩容内での時刻）が前記上体傾斜角復元期間内の時刻であるときには、S518～S526の処理によって、上体角加速度 β は、第n動力学モデル上で、上体傾斜復元モーメントZMP換算値パターンの瞬時値（これは、前記仮決定された上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値と現在時刻kとに応じて定まる。図25を参照）に対応する床反力モーメントを発生するように決定される。また、上体水平加速度は、第n動力学モデル上で、上体並進モードによって発生する目標ZMPまわりの床反力モーメントが0になるための上体水平加速度と、上体角加速度 β による床反力モーメントと同等の床反力モーメントを発生する上体水平加速度との差として求められる。これにより、上体姿勢を基準上体姿勢に向かって復元させつつ、目標ZMPを満足するように上体角加速度 β および上体水平加速度 α が決定される。

【0133】

なお、第1実施形態では、第1動力学モデルは、上体回転モードを考慮していないので、S200-1の処理の中で、図19のS518～S526の処理を行うときには、常に $\beta = 0$ とされる。

【0134】

補足すると、図19のS504～S516の処理の基本的な考え方（手法）は、前記公報文献1の図23のS504～S516の処理と同様である。また、図19のS504～S516の処理の基本的な考え方（手法）は、前記公報文献1の図23のS520～S528の処理と同様である。但し、本明細書の第1実施形態では、S200-1～S200-nのそれぞれの処理の中で使用する動力学モデルが相違している。

【0135】

なお、図19のS500で設定する時刻 T_m は、上体傾斜復元期間の開始時刻、 T_{s2} は上体傾斜復元期間の終了時刻、 T_e は定常歩容の終端時刻（ $= T_s + T_{cyc}$ ）である（図25を参照）。

【0136】

以上説明した図14の処理において、第1実施形態では、第1動力学モデル、第2動力学モデル、第3動力学モデルは、この順に動力学的な精度が高いものとなっている。このため、図14の処理によって、定常歩容の境界条件を満足するような定常歩容を上体位置姿勢の発散が生じたりすることなく、しかも、動力学的な精度も十分に満たしつつ効率よく短時間で作成して、定常歩容の初期状態を適切に求めることができる。

【0137】

図12の説明に戻って、以上説明したようにS024の処理を実行した後、S026において、今回歩容の歩容パラメータが決定（一部は仮決定）される。この処理は、図20のフローチャートに従って実行される。ここで決定する歩容パラメータとしては、足平位置姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、腕姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、床反力水平成分許容範囲、ZMP軌道を規定するパラメータがある。この処理は、前記公報文献1の図33のフローチャートの処理と同一であるので、ここでの詳細な説明は省略するが、上記各軌道

が定常歩容につながるように各軌道を規定する歩容パラメータが決定される。

【0138】

補足すると、ここで決定されるZMP軌道パラメータは仮値であり、その仮値により規定されるZMP軌道の例(X軸方向の軌道の例)が図27の最上段に示されている。また、図20のS612で設定する上体傾斜角復元期間は、図27の時刻Taから時刻Tbまでの期間であり、片脚支持期の開始直後から終了直前までの期間である。

【0139】

次いで、S026に進んで、今回歩容の歩容パラメータ(ZMP軌道パラメータ)が修正される。この処理では、今回歩容の終端における発散成分がS024で決定した定常巡回歩容の初期発散成分に一致するように(より詳しくは上体位置姿勢軌道を定常歩容に連続させ、もしくは近づけるように)、今回歩容の歩容パラメータのうちのZMP軌道パラメータが修正される。

【0140】

この処理は、図21のフローチャートで示すサブルーチン処理に従って、前記第1～第3動力学モデルを順次使用する段階的な探索処理により行われる。

【0141】

図21に示すとおり、S700-1、S700-2、……、S700-n(第1実施形態では $n=3$)の処理が順次実行され、最終的に第nモデル(第n動力学モデル)上で、今回歩容の終端発散成分が定常歩容の初期発散成分に一致もしくはほぼ一致するように、ZMP修正量aと、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbとが決定される。補足すると、図21のフローチャートの処理中で求める上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbは、上体傾斜角復元期間で上体姿勢を基準上体姿勢に近づけるために必要な床反力モーメントのZMP換算値のパターンの2つのピーク値を示すものであり、その例を図示したものが図26である。定常歩容の場合の上体傾斜復元モーメントZMP換算値のピーク値は1つであったが、今回歩容の終端における上体姿勢角およびその角速度をそれぞれ定常歩容の初期上体姿勢角およびその角速度に一致させるために、本実施形態では、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の調整可能な2つのパラメータとして、第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbが用いられる。

【0142】

また、図21のフローチャートの処理中で求めるZMP修正量aは、今回歩容を定常歩容につなげるための目標ZMPの補正量であり、その例を図示したものが、図27の中段の図である。

【0143】

図21の処理の概要を説明すると、まず、第1動力学モデル上で今回歩容を定常歩容につながらせるように(今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致もしくはほぼ一致させるように)、ZMP修正量aと、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbが探索的に決定される。そして、この第1動力学モデルを用いて決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbを新たに探索初期値として用い、第2動力学モデル上で今回歩容を定常歩容につながらせるようにa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbが改めて探索的に決定される。さらに、この第2動力学モデルを用いて決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbを新たに探索初期値として用い、第3動力学モデル上で今回歩容を定常歩容につながらせるようにa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbが改めて探索的に決定される。より一般化して言えば、動力学モデルの個数をnとしたとき、第k-1動力学モデル($k:2$ 以上の整数)を用いて決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbを探索初期値として用い、第k動力学モデル上で今回歩容を定常歩容につながらせるようにa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbを改めて探索的に決定する、という処理を繰り返す。そして、最終的に、第n動力学モデルを用いて決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbが求めるべき歩容パラメータ(今回歩容の歩容パラメータ)の修正値として得られる。

【0144】

S700-1の処理は、より詳しくは、図22のフローチャートに示す如く実行される。それを概略的に説明すれば、まず、探索対象であるa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの第1モデル（第1動力学モデル）上での値の初期値が仮決定され、これらの値と第1モデルとを用いて今回歩容（仮今回歩容）が算出される。そして、その算出した仮今回歩容の終端（今回歩容の遊脚足平の着地時刻）での発散成分と定常歩容の初期発散成分（前記S024で第nモデルを用いて最終的に算出したもの）との差、仮今回歩容の終端での上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角（前記S024で第nモデルを用いて最終的に算出したもの）との差、並びに、仮今回歩容の終端での上体姿勢角の角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度（前記S024で第nモデルを用いて最終的に算出したもの）との差が求められる。そして、これらの差の値がいずれも許容範囲内にあるか否か（0に近いかな否か）の条件を満たしているか判断し、満たしていない場合には、探索対象の値を変更する。これを繰り返すことで、最終的に第1モデル上で仮今回歩容を定常歩容につながらせることが可能な歩容パラメータ修正値としてのa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbが決定される。なお、本実施形態では、第1モデルを用いるa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの探索処理では、それらの探索対象の初期値は、基本的には任意でよいが、例えば前回歩容の作成時に最終的に決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの値などを基に決定してもよい。

【0145】

図22の処理のうちのS754の処理は、図24のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。これについては後述する。

【0146】

また、図21のS700-2、……、S700-nの処理は、いずれも図23のフローチャートに示す如く実行される。この処理は、S1700で設定する探索対象の初期値と、S1704およびS1714で用いる動力学モデルとが図22の処理と相違し、これ以外は、図22の処理と同一である。なお、図23では、「n」は、2以上の整数を一般的に表しており、第1実施形態では、2又は3である。

【0147】

S1704では、探索対象であるa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの初期値として、第mモデル（ $m = n - 1$ ）を用いて先に求めた探索対象の値（S700-mで求めた値）を設定する。そして、S1704およびS1714の処理では、第nモデルを用いて仮今回歩容が算出される。

【0148】

なお、図23の処理のうちのS1704の処理は、図22のS754と同様、図24のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。

【0149】

図24の処理は、図示の通り、前回歩容の終端状態（詳しくは今回歩容の支持脚座標系で見た終端状態）を今回歩容（仮今回歩容）の初期状態として、今回歩容の終端時刻Tcurr（今回歩容の遊脚足平の着地予定時刻）まで今回歩容の瞬時値を時系列的に作成する処理である。そして、図24のS804のサブルーチン処理は、先に定常歩容の作成処理に関して説明した図18の処理と同一である。

【0150】

この場合の図18の処理では、S400、S404～S410の処理によって、S026で求めた今回歩容のパラメータを基に、目標床反力鉛直成分、目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢、目標上体鉛直位置、床反力水平成分許容範囲の瞬時値が求められる。また、S402の処理によって、S026で求めた今回歩容のZMP軌道パラメータから定まる仮目標ZMP（図27の最上段図を参照）を、S028で最終的に求めたZMP修正量aを基に補正してなる目標ZMP（図27の最下段図を参照）の瞬時値が求められる。さらに、S412の処理によって、第nモデル（nは、S700-1の処理の中では「1」、S700-2の処理の中では「2」、……、S700-nの処理の中では「n」）の瞬時値が求められる。

n」)。このことは、S412のサブルーチン処理である図19においても同じ)を用いて、図中に記載された条件を満たすように上体水平加速度および上体姿勢角加速度の瞬時値が決定される。そして、S414の処理によって、上体水平加速度および上体姿勢角加速度をそれぞれ2階積分して、上体水平位置および上体姿勢角の瞬時値が決定される。

【0151】

また、仮今回歩容の作成時におけるS412のサブルーチン処理である図19の処理も、定常歩容の場合と同様に行われる。すなわち、仮今回歩容の瞬時値を作成しようとしている現在時刻k(作成中の仮今回歩容内での時刻)が前記上体傾斜角復元期間内の時刻でないときには、S504~S516の処理によって、第nモデル上で、目標ZMPを満足し、且つ、全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分が時刻kの床反力水平成分許容範囲の瞬時値内に収まるように、上体並進モードの上体水平加速度 α と、上体回転モードの上体角加速度 β (上体姿勢角の角加速度)とが決定される。

【0152】

補足すると、第1実施形態では、第1動力学モデルは、上体回転モードを考慮していないので、S700-1の処理の中で、図19のS504~S516の処理を行うときには、S200-1の処理の中で図19のS504~S516の処理を行う場合と同様に、床反力水平成分許容範囲は、無限大の範囲とするか、もしくは、床反力水平成分が確実に許容範囲内に収まるように十分に大きい範囲に設定される。

【0153】

なお、第1実施形態において第2モデルあるいは第3モデルを使用するS700-2またはS700-3の中で設定する床反力水平成分許容範囲は、S200-2、S200-3の場合と同様、基本的には同じでよいが、異なる範囲に設定してもよい。

【0154】

また、現在時刻k(作成中の仮今回歩容内での時刻)が前記上体傾斜角復元期間内の時刻であるときには、S518~S526の処理によって、上体角加速度 β は、第n動力学モデル上で、上体傾斜復元モーメントZMP換算値パターンの瞬時値(これは、S028で最終的に決定された上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbと現在時刻kとに応じて定まる。図26を参照)に対応する床反力モーメントを発生するように決定される。また、上体水平加速度は、第n動力学モデル上で、上体並進モードによって発生する目標ZMPまわりの床反力モーメントが0になるための上体水平加速度と、上体角加速度 β による床反力モーメントと同等の床反力モーメントを発生する上体水平加速度との差として求められる。これにより、上体姿勢を基準上体姿勢に向かって復元させつつ、目標ZMPを満足するように上体角加速度 β および上体水平加速度 α が決定される。

【0155】

なお、第1実施形態では、第1動力学モデルは、上体回転モードを考慮していないので、S700-1の処理の中で、図19のS518~S526の処理を行うときには、常に $\beta=0$ とされる。

【0156】

また、仮今回歩容を生成する場合の上体傾斜復元期間は前記図20のS612で決定した時刻TaからTbの期間であるので、図19のS500の処理は省略される。

【0157】

以上説明した図21の処理において、第1実施形態では、第1動力学モデル、第2動力学モデル、第3動力学モデルは、この順に動力的な精度が高いものとなっている。このため、図21の処理によって、定常歩容につながるような今回歩容を作成し得る歩容パラメータを、上体位置姿勢の発散が生じたりすることなく、しかも、動力的な精度も十分に満たしつつ効率よく短時間で決定できる。

【0158】

図12の説明に戻って、以上説明したようにS028の処理を実行した後、S030に進んで、フルモデル補正用のZMP許容範囲と床反力水平成分許容範囲を規定するパラメ

ータが決定される。

【0159】

この処理は、前記公報文献1の図13のS030の処理と同一であり、ここでの説明は省略する。

【0160】

以上説明したS018からS030までの処理が、前記図5の歩容パラメータ決定部100aで実行される処理である。

【0161】

S030の処理を実行した後、あるいは、S016の判断結果がNOであるときには、S032に進んで、今回歩容の瞬時値を逐次決定する。この処理のサブルーチン処理は、仮今回歩容の生成に関して説明した前記図24のフローチャートの処理と同じである。但し、この場合に使用する動力学モデルは、第1実施形態では第3モデルに固定される。また、ZMP修正量a、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbとしては、図12のS028で最終的に決定したものが用いられる。

【0162】

次いで、S034に進んで、ロボット1のスピン（鉛直軸まわりの回転）をキャンセルするための腕体の動作が決定される。この処理は、ロボット1の腕を振らずに目標歩容通りにロボット1を運動させた場合に目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントの鉛直成分と逆向きの床反力モーメントを腕体の腕振り（両腕を前後逆方向に振る運動）によって発生させるように腕体の姿勢を決定するものであり、前記公報文献1の図13のS034と同様に行われる。その詳細は、同公報文献1に記載されているので、ここではさらなる説明を省略する。

【0163】

次いで、S036に進んで、フルモデル補正用（前記フルモデル補正部100eの処理用）のZMP許容範囲の瞬時値と、床反力水平成分許容範囲の瞬時値とが決定される。この処理では、前記S030で決定したZMP許容範囲および床反力水平成分許容範囲を規定する歩容パラメータに基づいて決定される。

【0164】

以上説明したS032～S036の処理が、前記図5の目標瞬時値発生部100bで実行される処理の詳細である。

【0165】

次いで、S038に進んで、フルモデルを用いた補正歩容を発生する。この処理は、前記フルモデル補正部100cにより実行される処理である。この場合、この処理は、前記公報文献1の図13のS038の処理と同一であり、同公報文献1に記載されたとおりに実行される。従って、本明細書では詳細な説明は省略する。この処理により、目標上体位置姿勢（前記変位次元補正歩容の上体位置姿勢）をさらに修正してなる補正目標上体位置姿勢と補正目標床反力モーメントとが決定される。

【0166】

以上が、本実施形態における歩容生成装置100の歩容生成処理である。

【0167】

次に図4を参照して複合コンプライアンス制御装置101の動作を説明しておく。なお、複合コンプライアンス制御装置101の動作は、本出願人が先に出願した特開平10-277969号公報などに詳細に記載されているので、本明細書では概略的な説明にとどめる。歩容生成装置100において、上記したように生成された目標歩容のうち、補正目標上体位置姿勢（軌道）、目標腕姿勢（軌道）が、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）102に送出される。

【0168】

また、目標足平位置姿勢（軌道）、目標ZMP軌道（目標全床反力中心点軌道）、および目標全床反力（軌道）（補正目標床反力モーメントと目標床反力鉛直成分）は、複合コ

ンプライアンス動作決定部104に送られると共に、目標床反力分配器106にも送られる。そして、目標床反力分配器106で、床反力は各足平22に分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定される。この決定された目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力は複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。

【0169】

複合コンプライアンス動作決定部104から、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル102に送られる。ロボット幾何学モデル102は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する脚体2、2の12個の関節の関節変位指令（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の12個の関節の変位を追従制御する。また、ロボット幾何学モデル102は、目標腕姿勢を満足する腕関節の変位指定（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の腕体の12個の関節の変位を追従制御する。

【0170】

ロボット1に生じた床反力（詳しくは実各足床反力）は6軸力センサ50によって検出される。その検出値は前記複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。また、ロボット1に生じた姿勢傾斜偏差 θ_{errx} 、 θ_{erry} （詳しくは目標上体姿勢角に対する実姿勢角の偏差で、ロール方向（X軸回り）の姿勢角偏差が θ_{errx} であり、ピッチ方向（Y軸回り）の姿勢角偏差が θ_{erry} である）が姿勢センサ54を介して検出され、その検出値は姿勢安定化制御演算部112に送られる。この姿勢安定化制御演算部112で、ロボット1の上体姿勢角を目標上体姿勢角に復元するための目標全床反力中心点（目標ZMP）まわり補償全床反力モーメントが算出されて複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。複合コンプライアンス動作決定部104は、入力値に基づいて目標床反力を修正する。具体的には、目標全床反力中心点（目標ZMP）回りに補償全床反力モーメント、あるいは、補償全床反力モーメントと補正目標床反力モーメントとの和が作用するように目標床反力を修正する。

【0171】

複合コンプライアンス動作決定部104は、修正された目標床反力に、センサ検出値などから算出される実ロボットの状態および床反力を一致させようと上記機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。ただしすべての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。すなわち、各目標に対する制御偏差に重みを与えて、制御偏差（あるいは制御偏差の2乗）の重み付き平均が最小になるように制御する。これにより、実際の足平位置姿勢と全床反力とが目標足平位置姿勢と目標全床反力とに概ね従うように制御される。

【0172】

なお、以上説明した第1実施形態では、前記した第1～第3動力学モデルを用いたが、これ以外の複数の動力学モデルを用いてもよい。この場合の複数の動力学モデルは、例えば次のように構成してもよい。

【0173】

すなわち、図28を参照して、モデルAを例えば前記第2動力学モデル、モデルBを前記第3動力学モデルとする。この場合、モデルA、Bは、いずれも、目標上体位置姿勢などの目標運動と、目標ZMP、目標床反力水平成分許容範囲などを入力として、目標ZMPまわりの床反力モーメントと並進床反力（床反力水平成分）とを出力する動力学モデルとして表現できることとなる。そして、モデルCを、モデルAが出力する床反力モーメントにある重み r （ $0 \leq r \leq 1$ ）を乗算したものとモデルBが出力する床反力モーメントに重み $1-r$ を乗算したものととの和の床反力モーメントを出力すると共に、モデルAが出力する並進床反力に重み r を乗算したものとモデルBが出力する並進床反力に重み $1-r$ を乗算したものととの和の並進床反力を出力するモデルとする。このようにモデルCを定めた

とき、モデルCは、重み r を1に近づけると、その動力学的挙動はモデルAに近くなり、重み r を0に近づけると、その動力学的挙動はモデルBに近くなる。従って、 r の値を0から1の範囲で、複数種類の値に設定すれば、複数種類の動力学モデルCが構築できるととなる。このように構築した複数の動力学モデルを前記第1～第3動力学モデルの代わり使用してもよい。

【0174】

なお、前記第1実施形態の如く、上体回転モードを調整することによって並進床反力水平成分許容範囲を満足する歩容を生成する場合には、モデルA、Bはいずれも上体回転モードによって発生する床反力モーメントを考慮した（無視しない）モデルである必要がある。この場合、例えばモデルA、Bをそれぞれ前記第2動力学モデル、第3動力学モデルとすることで、その必要条件が満たされる。

【0175】

また、複数の動力学モデルは、その構造および動力学的方程式（運動方程式）を互いに同じにしつつ、それぞれの動力学モデルに付加する制約条件を互いに異なるものとしてもよい。例えば、図29に示す如く、動力学モデルで、床反力水平成分許容範囲が異なるようにしてもよい。この場合、各動力学モデルの構造および動力学方程式は、例えば前記第2動力学モデルと同じでよい。

【0176】

また、複数の動力学モデルのうちの最も動力学的精度の高いモデルは、前記フルモデルと同じでもよい。その場合、これらの複数の動力学モデル（前記図12のS024、S028で用いる動力学モデル）に対する床反力水平成分許容範囲は、歩容パラメータの探索処理の収束性を高めるために、フルモデル補正用のものよりも広めにするのが望ましい。

。

【0177】

補足すると、前記図12のS024、S028で用いる複数の動力学モデルは、フルモデル補正用のフルモデルよりも動力学的精度が低いものであることが効果的である。これは、歩容パラメータの探索処理の収束性を高めつつ、フルモデル補正における目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメント、あるいはこれに相当する目標ZMPの修正量を小さくでき、その結果、最終的にフルモデル補正によって生成される歩容の安定余裕を高めることができるからである。

【0178】

次に本発明の第2実施形態を、主に図30および図31を参照して説明する。

【0179】

この第2実施形態は、それを概略的に説明すれば、既に作成済みの歩容に係わる歩容パラメータを初期値として、その歩容パラメータの一部を、これから作成しようとする歩容に対応して定まる歩容パラメータに段階的に近づけつつ、残りの歩容パラメータを探索的に決定するものである。

【0180】

第2実施形態では、図12のS024の処理が、図30のフローチャートで示すサブルーチン処理によって実行され、図12のS028の処理が、図31のフローチャートで示すサブルーチン処理で実行される。また、本実施形態では、これらの処理で使用する動力学モデルは1つであり、例えば前記第2動力学モデルが用いられる。これ以外は、第1実施形態と同一である。

【0181】

S024のサブルーチン処理である図30の処理を説明すると、まず、前回歩容（今回歩容の1歩前の歩容）を生成するときのS022およびS024の処理で決定した、初期上体位置 X_s およびその変化速度 V_{xs} 、初期上体姿勢角速度 ω_{bs} 、並びに、上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値 $ZMP_{precpeek}$ を含む第1旋回歩容パラメータの値を、今回歩容に係る第2旋回歩容パラメータの値の仮値とし、また、前回歩容（今回歩容の1歩前の歩容）を生成するときのS022およびS024の処理で決定した、上体3の初期状態を

含む第2旋回歩容パラメータの値を、今回歩容に係る第2旋回歩容パラメータの値の初期値とする。この処理(S2000)は、とりあえず前回歩容に係る定常歩容の第1旋回歩容、第2旋回歩容をそれぞれ、今回歩容に係る定常歩容の第2旋回歩容、第1旋回歩容として設定するということを意味する。

【0182】

そして、S2002-1において、探索対象である X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} を除く定常歩容パラメータ(より詳しくは、S022の処理で決定する定常歩容パラメータ)の値を、現在の値から今回歩容に関してS022で決定した定常歩容パラメータの値に所定量だけ近づけたものを、今回歩容に係る定常歩容パラメータ(X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} を除く)の初期値とする。

【0183】

次いで、S2004-1で、現在の定常歩容パラメータを基に、定常歩容の境界条件を満足するような探索対象 X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} の値を探索的に決定する。この処理は、前記図15の処理と同様に行われる。但し、ここで使用される動力学モデルは、本実施形態では、前記第2動力学モデルである。

【0184】

次いで、S2002-2において、S2002-1と同様に、探索対象である X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} を除く定常歩容パラメータの値を、現在の値から今回歩容に関してS022で決定した定常歩容パラメータの値に所定量だけさらに近づけたものを、今回歩容に係る定常歩容パラメータ(X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} を除く)の値とする。

【0185】

そして、S2004-2において、現在の定常歩容パラメータを基に、定常歩容の境界条件を満足するような探索対象 X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} の値を探索的に決定する。この処理は、前記図16の処理と同様に行われる。但し、ここで使用される動力学モデルは、本実施形態では、前記第2動力学モデルである。また、探索対象 X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} の初期値(図16のS1202で設定する値)は、S2004-1で求めた値に設定される。

【0186】

以後、S2002-2、2004-2の処理と同様の処理が繰り返され、S2002-nにおいて、探索対象である X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} を除く定常歩容パラメータの値を、現在の値から今回歩容に関してS022で決定した定常歩容パラメータの値に一致させる。

【0187】

そして、S2004-nにおいて、S2004-2と同様に、現在の定常歩容パラメータを基に、定常歩容の境界条件を満足するような探索対象 X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} の値を探索的に決定する。但し、探索対象 X_s 、 V_x 、 ω_b 、 ZMP_{peek} の初期値(図16のS1202で設定する値)は、S2004-(n-1)で求めた値に設定される。

【0188】

以後は、図14のS204からS224と同じ処理がS2006~S2010で実行される。これにより、今回歩容に係る定常歩容の初期状態(発散成分を含む)が決定される。

【0189】

次に、S028のサブルーチン処理である図31の処理を説明すると、まず、前回歩容(今回歩容の1歩前の歩容)を生成するときのS026およびS028の処理で決定した、ZMP修正量 a 、並びに、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値 ZMP_{peeka} および第2ピーク値 ZMP_{peekb} を含む今回歩容パラメータの値を、これから生成しようとする今回歩容パラメータの値の仮値とする。この処理(S2100)は、とりあえず前回歩容に係る歩容パラメータを今回歩容に係る歩容パラメータとして設定するということを意味する。

【0190】

そして、S2102-1において、探索対象である a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbを除く今回歩容パラメータ（より詳しくは、S026の処理で決定する歩容パラメータ）の値を、現在の値から今回歩容に関してS026で決定した定常歩容パラメータの値に所定量だけ近づけたものを、今回歩容パラメータ（ a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbを除く）の初期値とする。

【0191】

次いで、S2104-1で、現在の今回歩容パラメータを基に、今回歩容の境界条件（今回歩容の終端状態が定常歩容の初期状態に一致もしくはほぼ一致するという条件）を満足するような探索対象 a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbの値を探索的に決定する。この処理は、前記図22の処理と同様に行われる。但し、ここで使用される動力学モデルは、本実施形態では、前記第2動力学モデルである。

【0192】

次いで、S2102-2において、S2102-1と同様に、探索対象である a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbを除く今回歩容パラメータの値を、現在の値から今回歩容に関してS026で決定した今回歩容パラメータの値に所定量だけさらに近づけたものを、今回歩容に係る定常歩容パラメータ（ a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbを除く）の値とする。

【0193】

そして、S2104-2において、現在の今回歩容パラメータを基に、今回歩容の境界条件を満足するような探索対象 a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbの値を探索的に決定する。この処理は、前記図23の処理と同様に行われる。但し、ここで使用される動力学モデルは、本実施形態では、前記第2動力学モデルである。また、探索対象 a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbの初期値（図23のS1700で設定する値）は、S2104-1で求めた値に設定される。

【0194】

以後、S2102-2、2104-2の処理と同様の処理が繰り返され、S2102-nにおいて、探索対象である a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbを除く今回歩容パラメータの値を、現在の値から今回歩容に関してS026で決定した今回歩容パラメータの値に一致させる。

【0195】

そして、S2104-nにおいて、S2104-2と同様に、現在の定常歩容パラメータを基に、定常歩容の境界条件を満足するような探索対象 a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbの値を探索的に決定する。但し、探索対象 a 、ZMPrecpeeka、ZMPrecpeekbの初期値（図23のS1700で設定する値）は、S2104-(n-1)で求めた値に設定される。

【0196】

なお、第2実施形態では、歩容パラメータを前回歩容に対応するものから徐々に更新していくようにしたが、あらかじめ境界条件を満足する標準歩容パラメータを記憶保持しておき、それを起点として歩容パラメータを徐々に更新していくようにしてもよい。例えば、今回歩容の遊脚足平の着地予定位置姿勢を、ロボット1の同じ場所での足踏みを行う場合の位置姿勢から、要求値に対応する位置姿勢に徐々に変えたり、歩行周期を徐々に変えたりするようにしてもよい。

【図面の簡単な説明】

【0197】

【図1】本発明の実施形態を適用する移動ロボット（2足歩行ロボット）の全体構成を概略を示す図。

【図2】図1のロボットの各脚体の足平部分の構成を示す側面図。

【図3】図1のロボットに備えた制御ユニットの構成を示すブロック図。

【図4】図3の制御ユニットの機能的構成を示すブロック図。

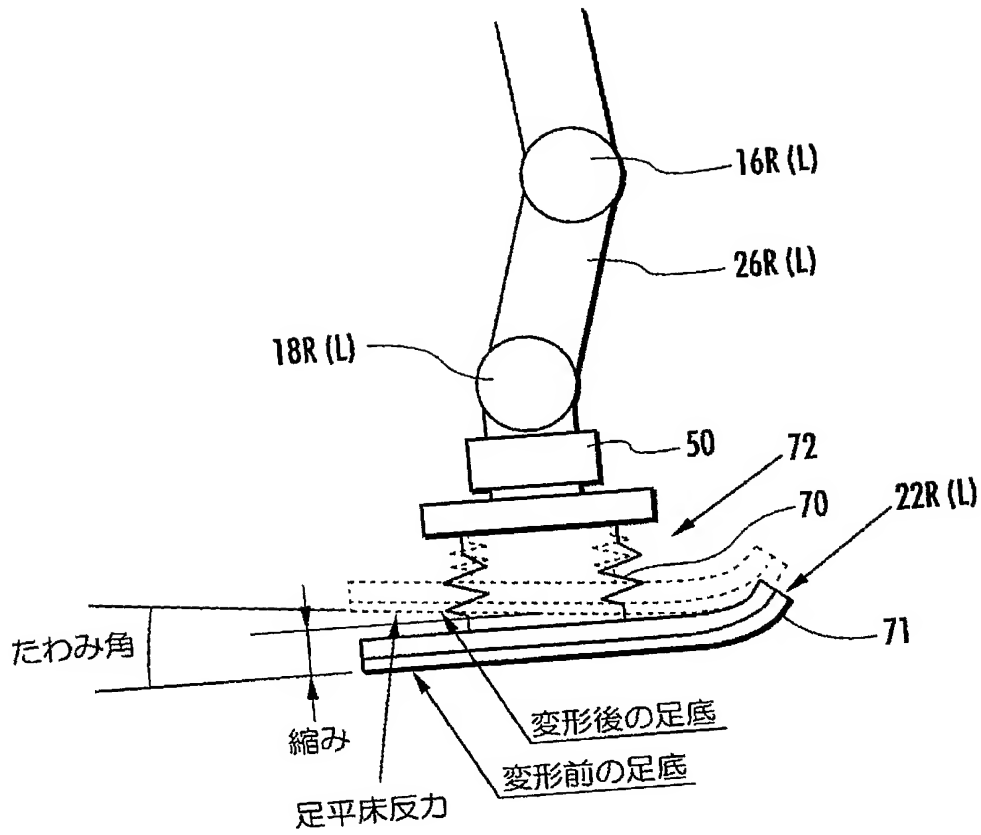
【図5】図4に示す歩容生成装置の機能を示すブロック図。

【図6】(a)、(b)はそれぞれロボットの運動モード（上体並進モード、上体回転モード）を説明するための図。

- 【図 7】 歩容生成で用いる第 1 動力学モデルの構造を示す図。
【図 8】 第 1 動力学モデルの演算処理を示すブロック図。
【図 9】 歩容生成で用いる第 2 動力学モデルの構造を示す図。
【図 10】 歩容生成で用いる第 3 動力学モデルの構造を示す図。
【図 11】 歩容生成で用いるフルモデルの構造を示す図。
【図 12】 第 1 実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート。
【図 13】 図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 14】 図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 15】 図 14 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 16】 図 14 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 17】 図 15 または図 16 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 18】 図 17 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 19】 図 18 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 20】 図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 21】 図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 22】 図 21 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 23】 図 21 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 24】 図 22 または図 23 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 25】 定常歩容における上体傾斜復元モーメント ZMP 換算値の例を示すグラフ。
【図 26】 今回歩容における上体傾斜復元モーメント ZMP 換算値の例を示すグラフ。
【図 27】 今回歩容における仮目標 ZMP と ZMP 修正量と目標 ZMP との例を示すグラフ。
【図 28】 動力学モデルの他の構成例を示すブロック図。
【図 29】 各動力学モデルで床反力水平成分許容範囲を異ならせる場合の例を示すグラフ。
【図 30】 第 2 実施形態における図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【図 31】 第 2 実施形態における図 12 のサブルーチン処理を示すフローチャート。
【符号の説明】
【0198】
1…2 足移動ロボット、100…歩容生成装置。

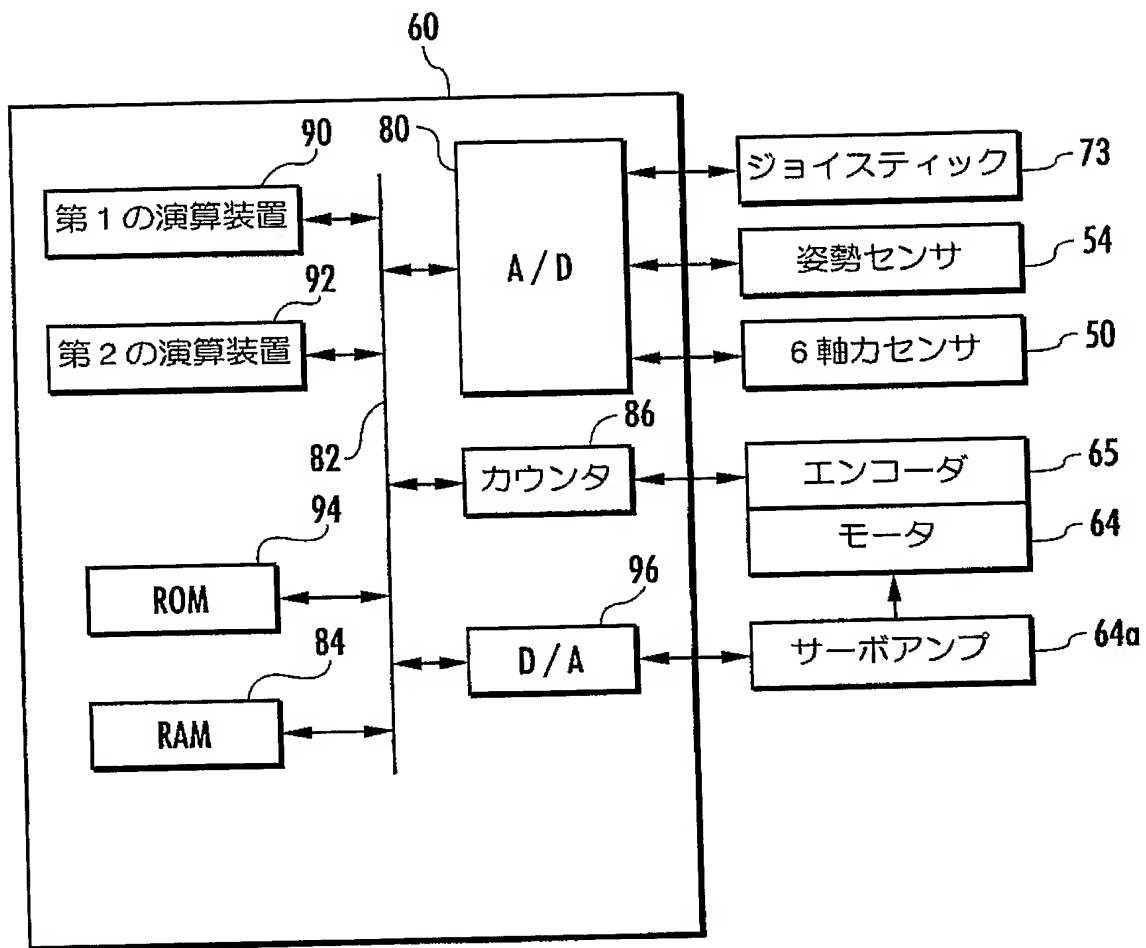
【図 2】

FIG.2



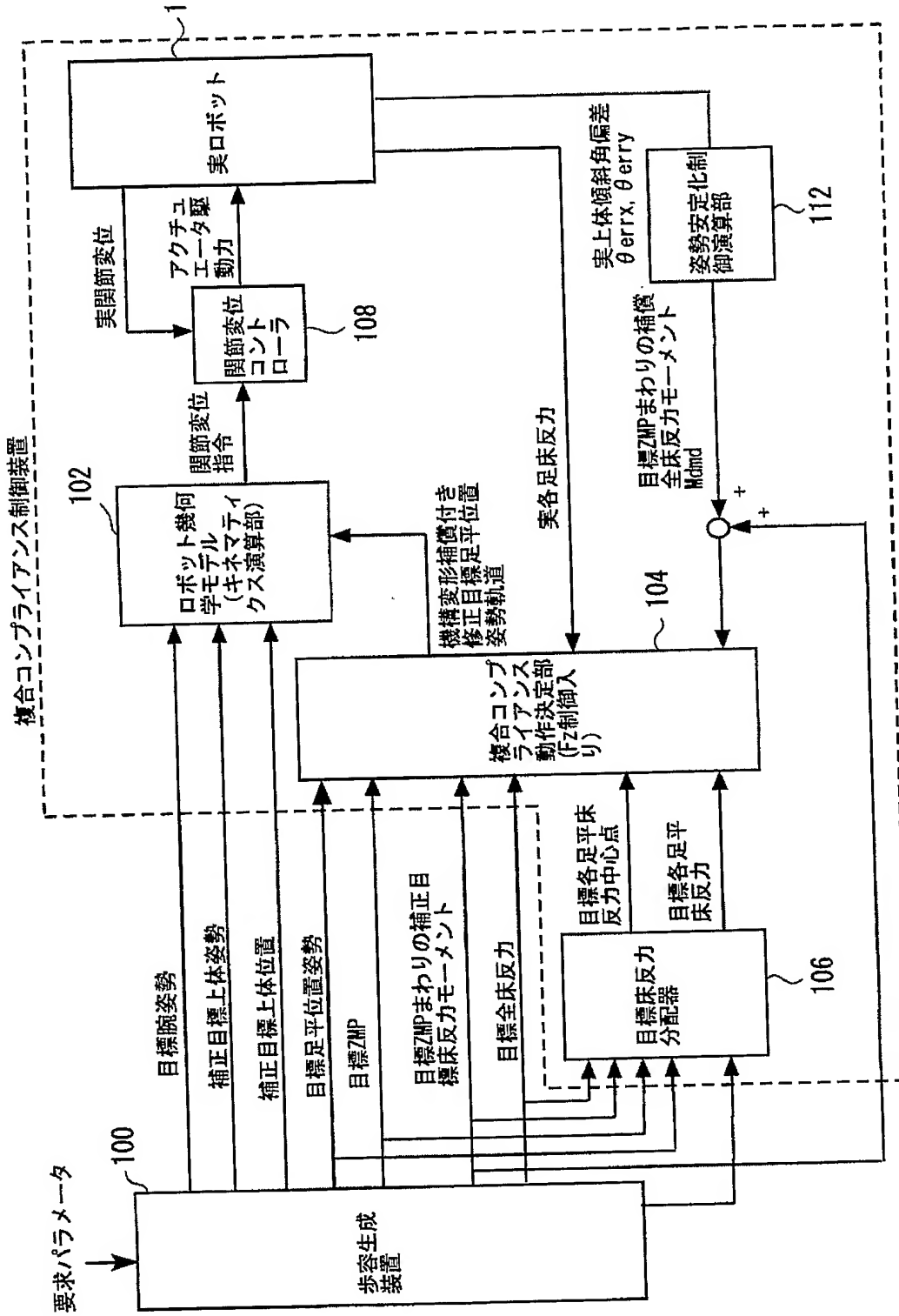
【図 3】

FIG.3



【図4】

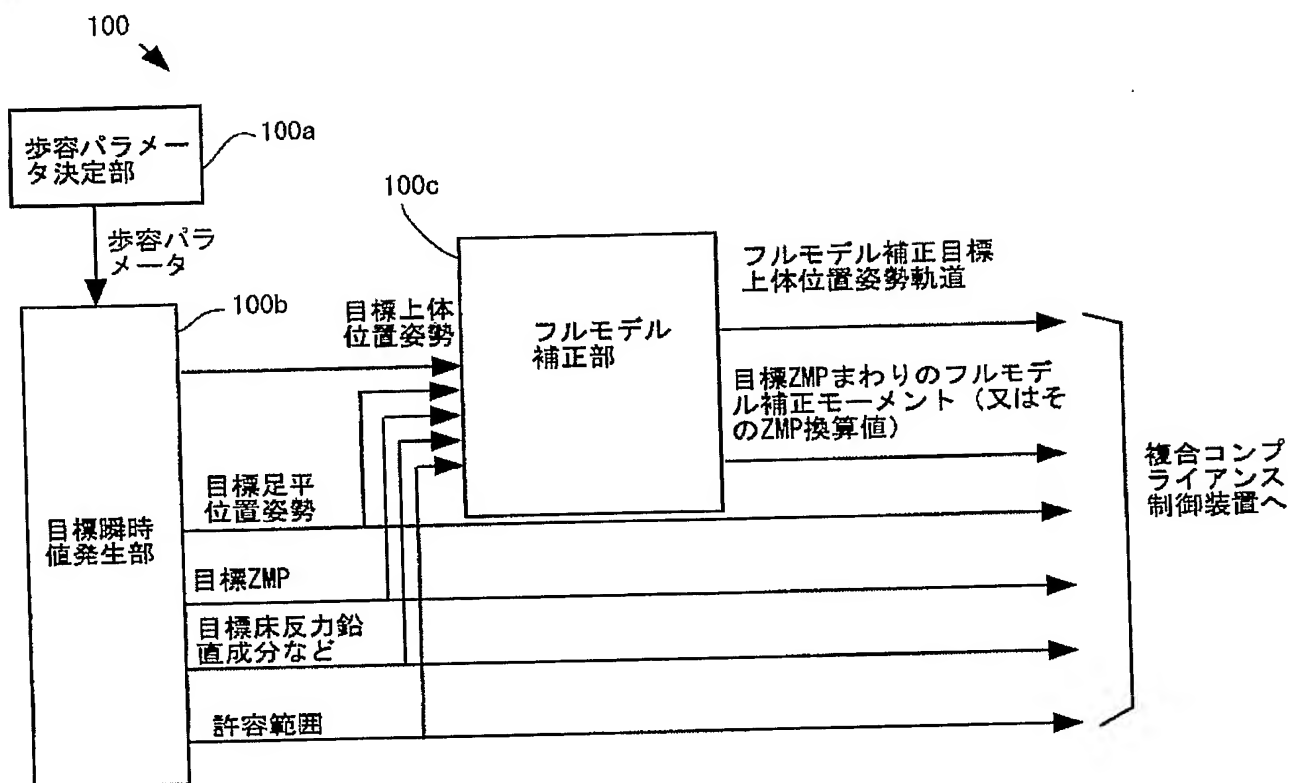
FIG.4
(制御ユニットの機能ブロック図)



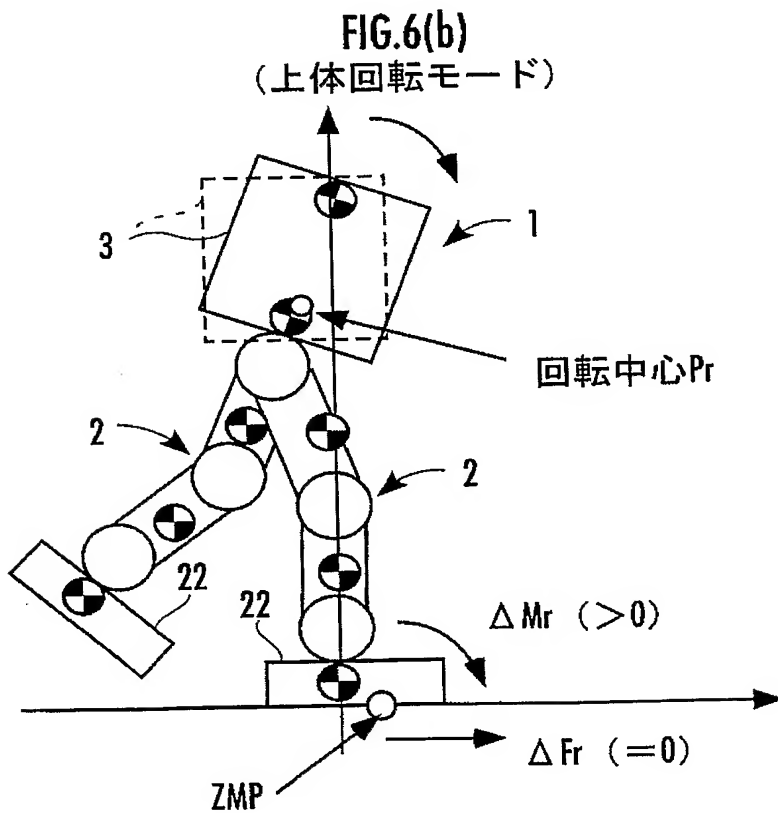
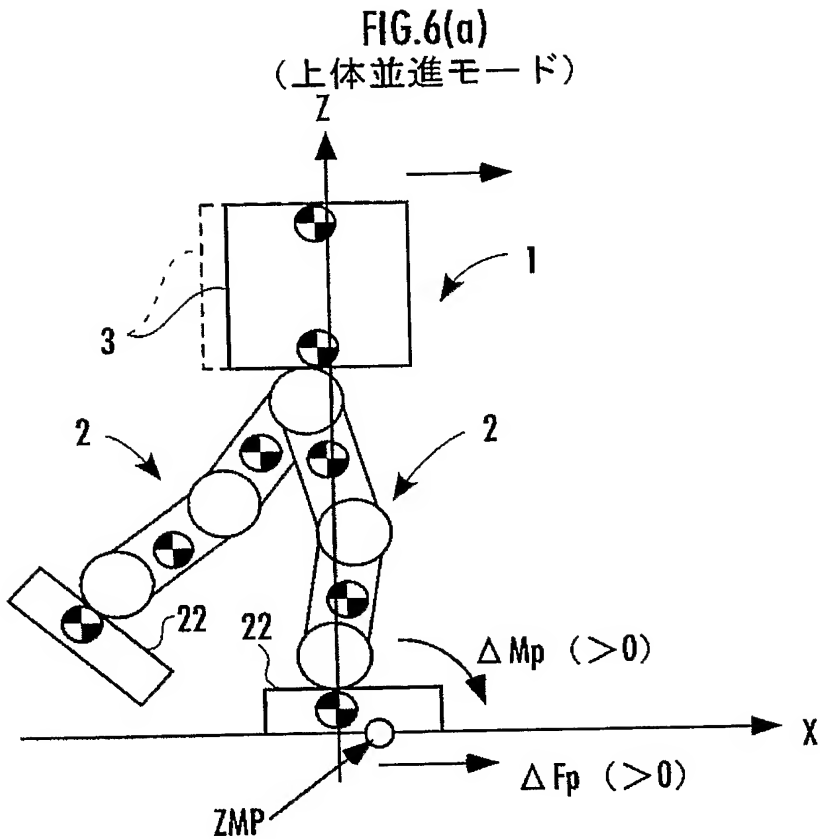
【図 5】

FIG.5

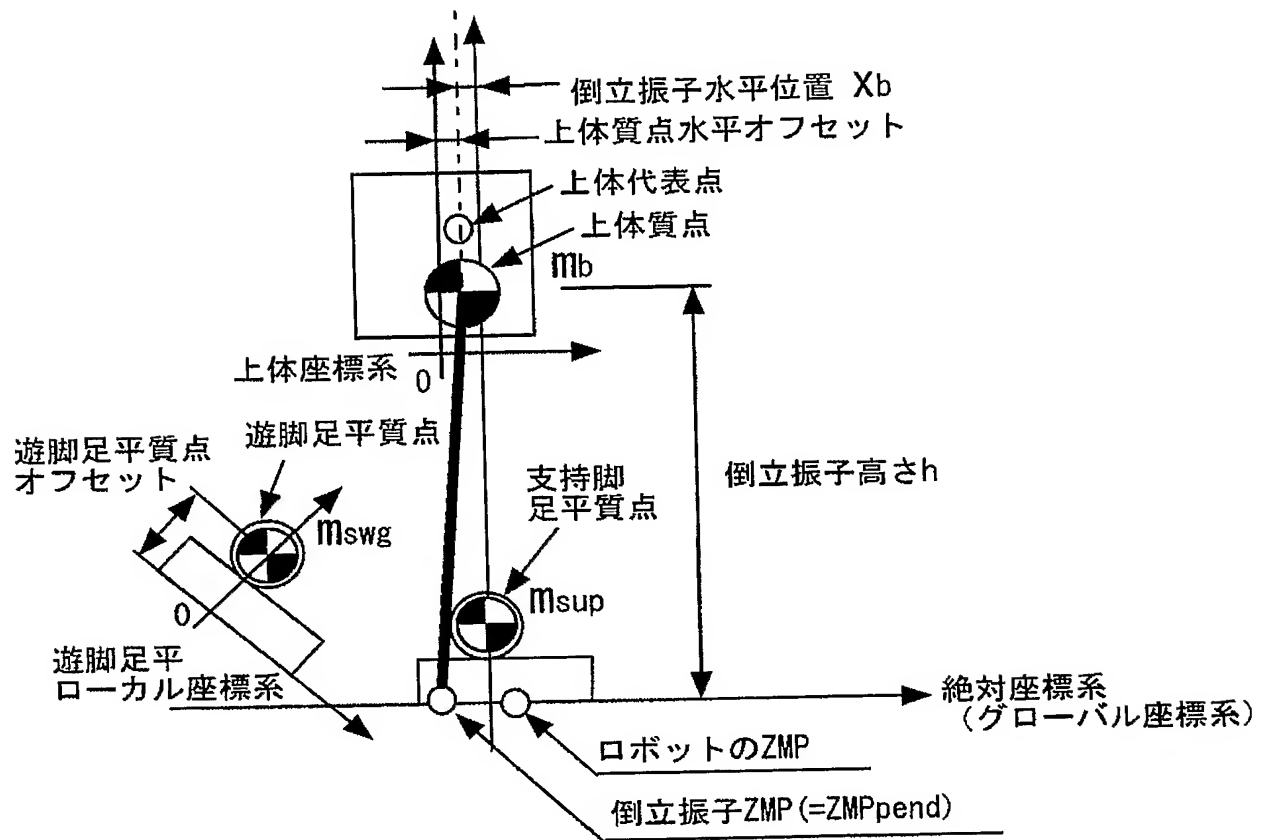
(フルモデル補正入り歩容生成装置の機能ブロック図)



【図 6】

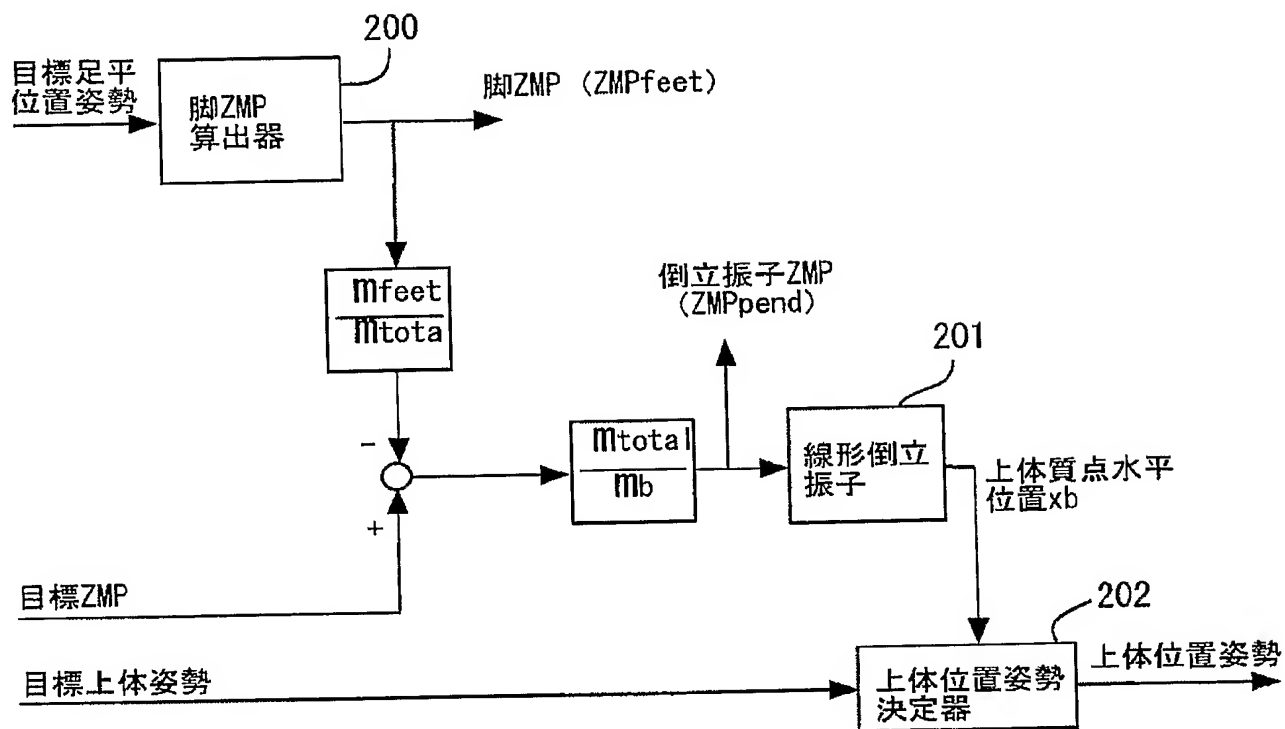


【図 7】

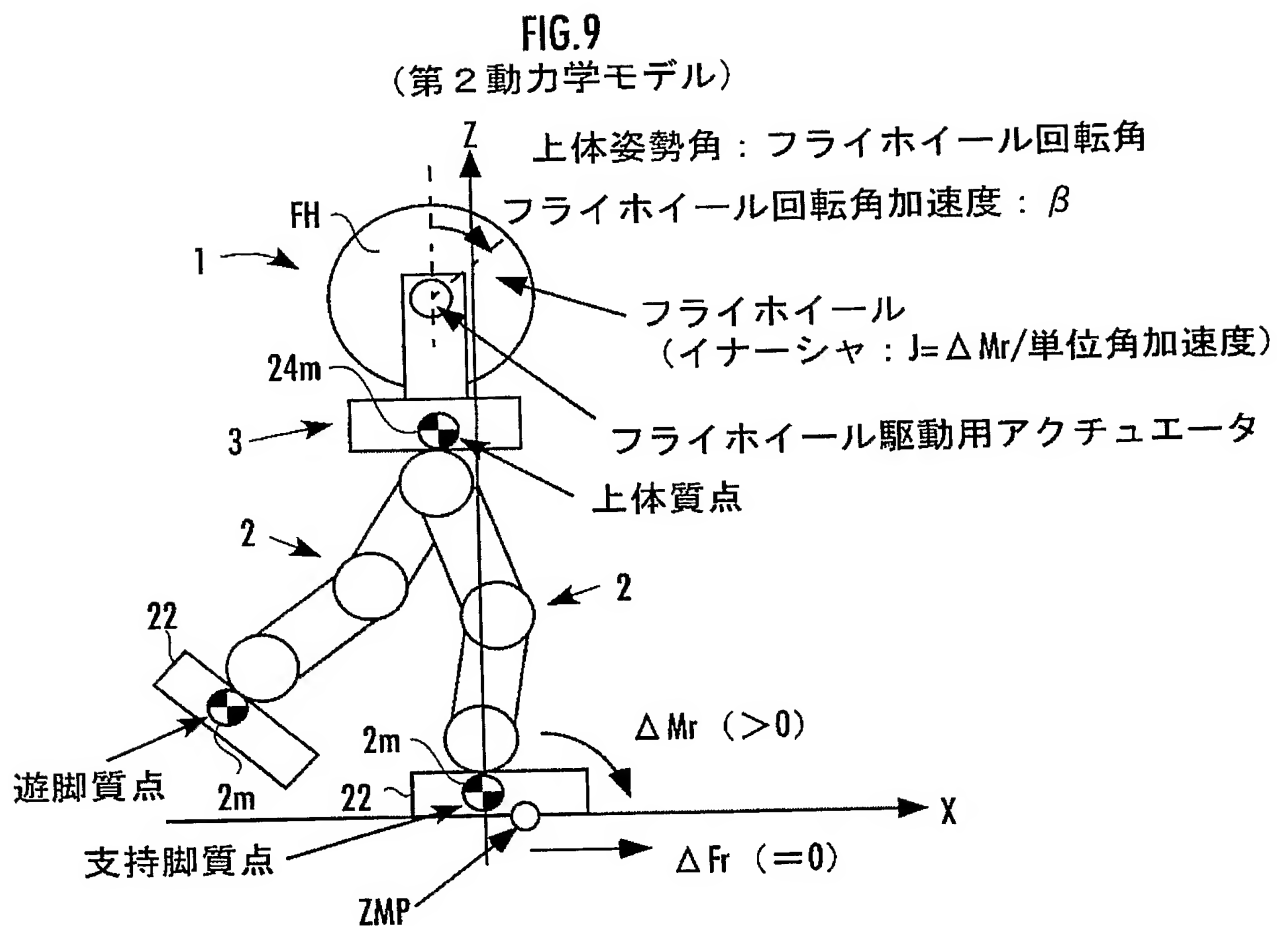
FIG.7
(第 1 動力学モデル)

【図 8】

FIG. 8

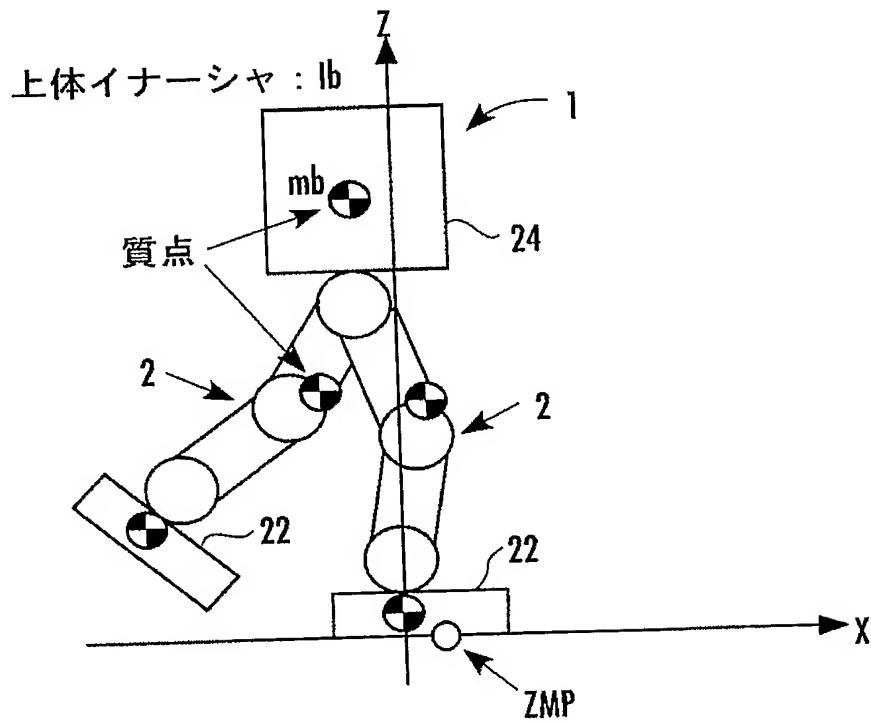


【図 9】



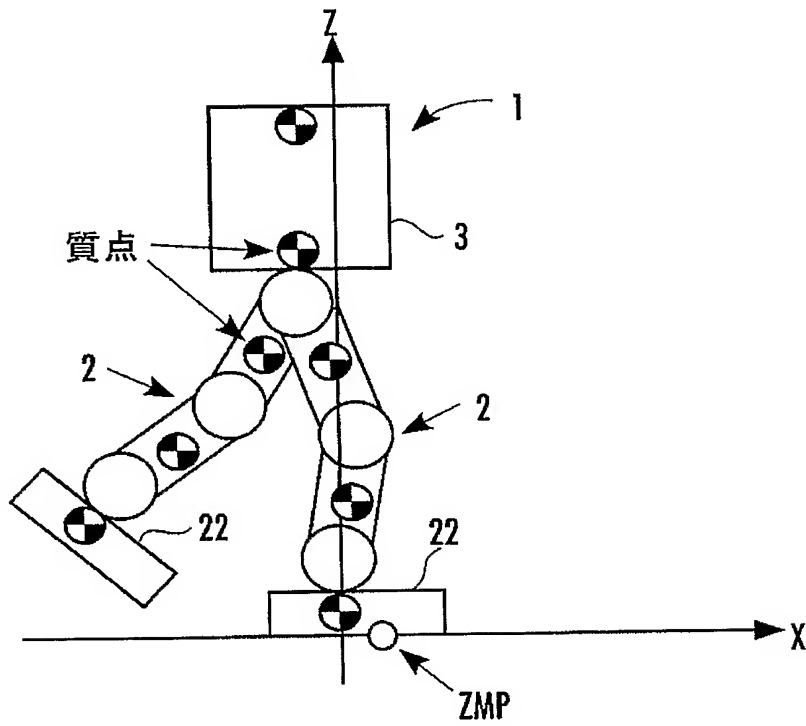
【図10】

FIG.10
(第3 動力学モデル)



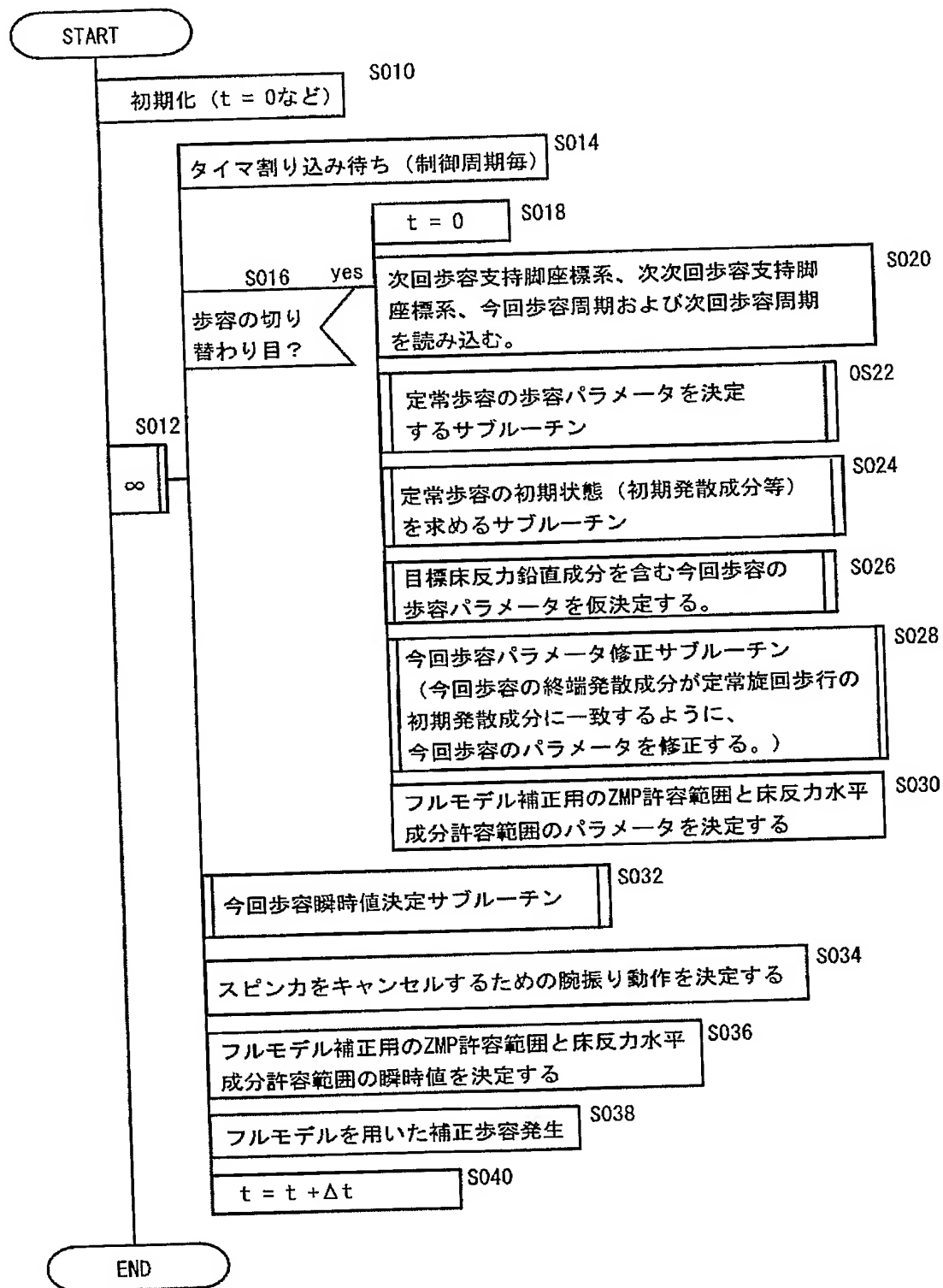
【図 11】

FIG.11
(フルモデル)



【図 12】

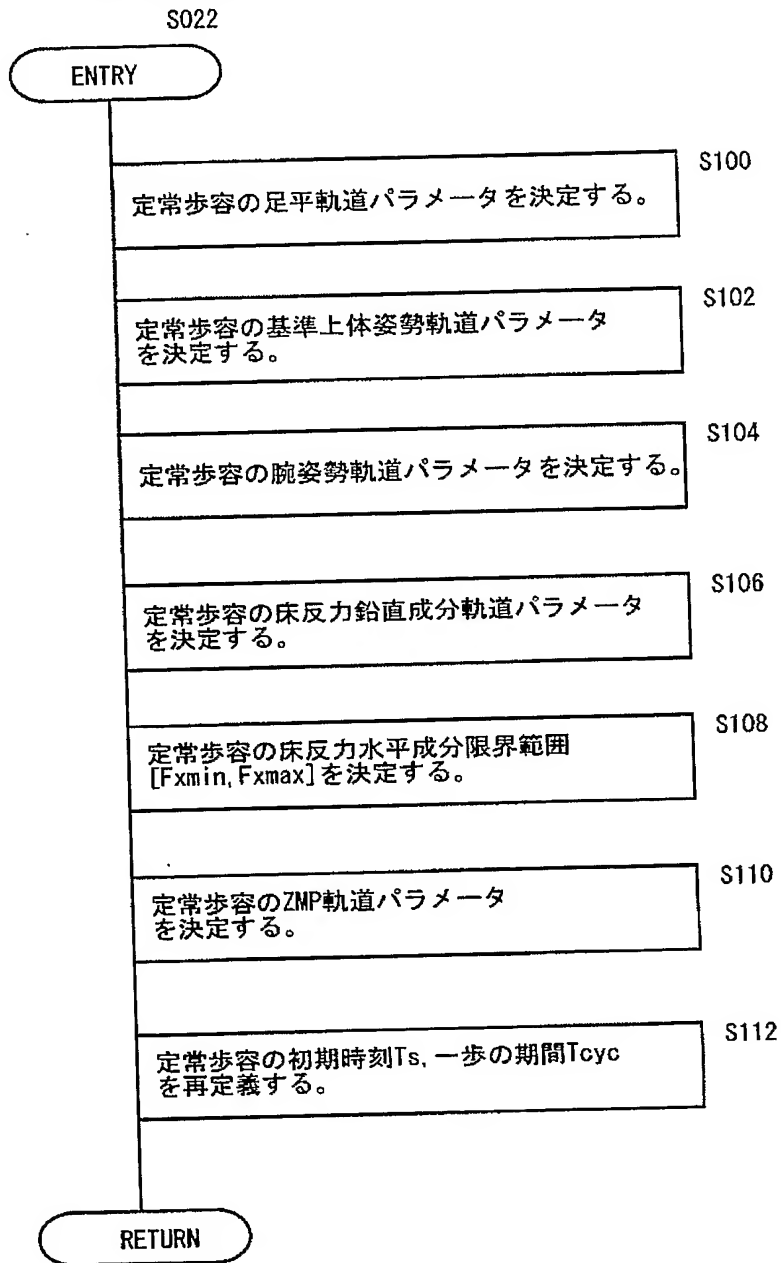
FIG.12
(歩容生成処理のフローチャート)



【図 13】

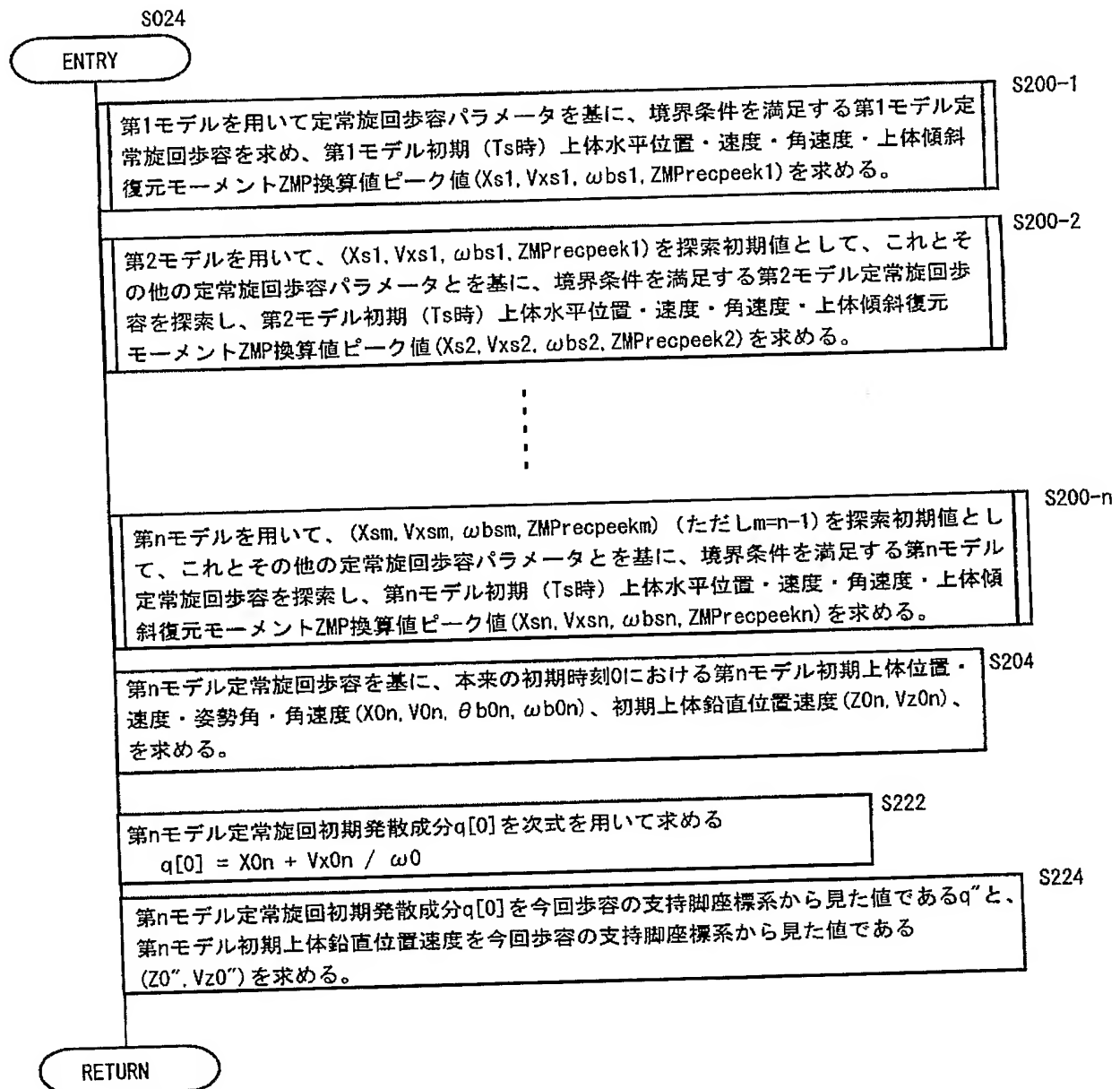
FIG.13

(定常歩容パラメータの決定処理)



【図 14】

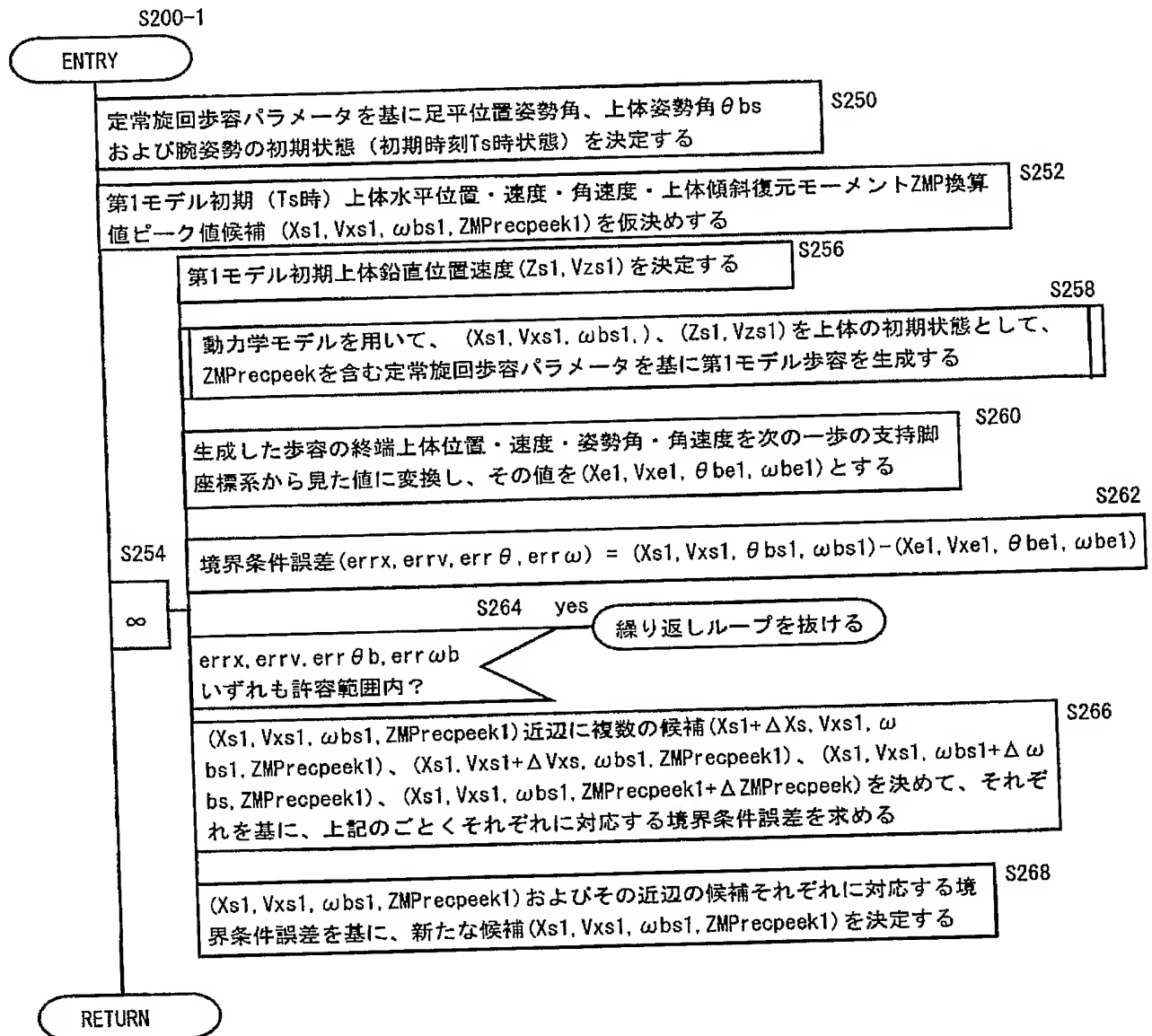
FIG.14
(定常歩容の初期発散成分の段階的探索処理)



【図 15】

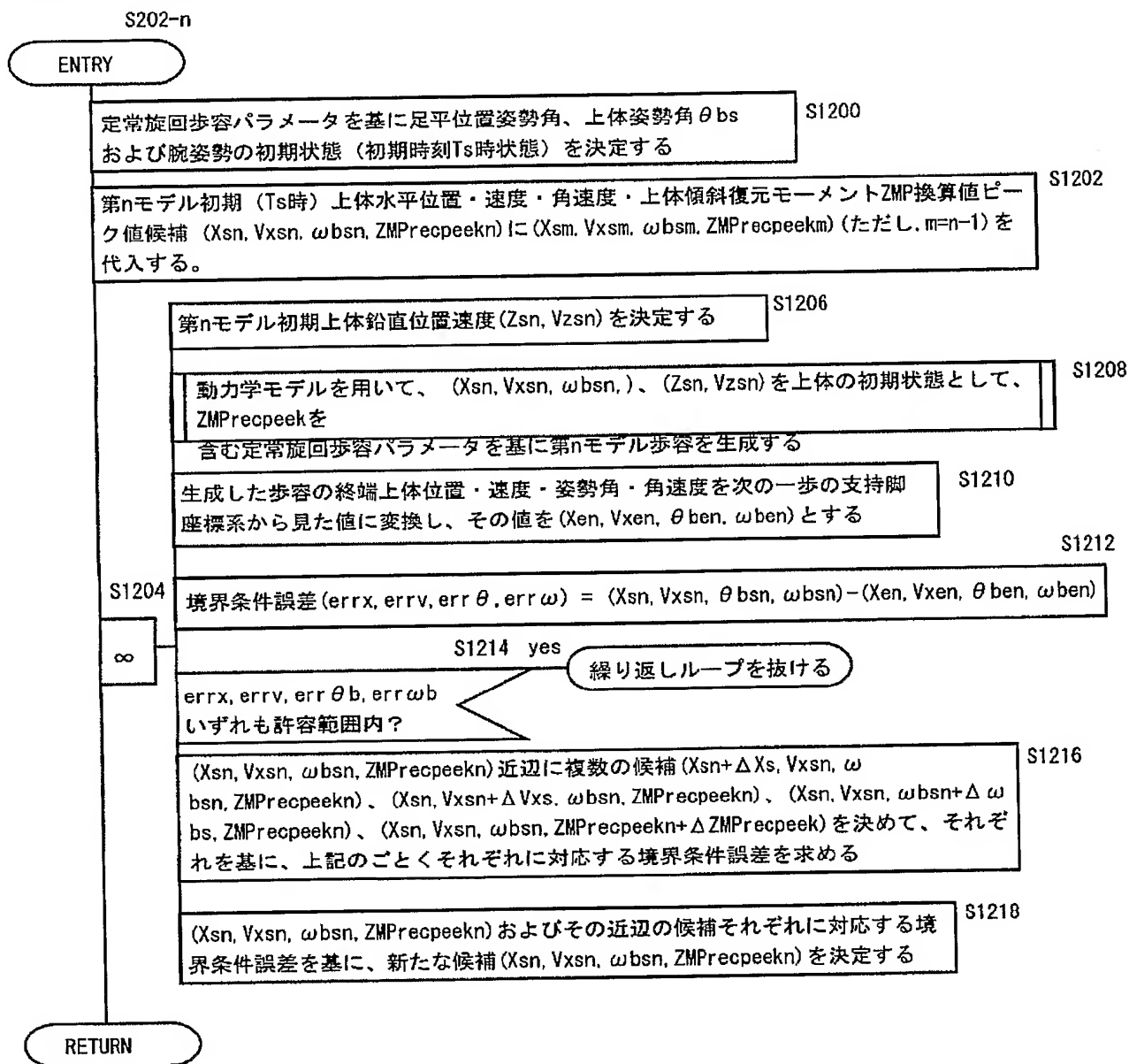
FIG.15

(第1モデル定常歩容の初期発散成分の探索処理)



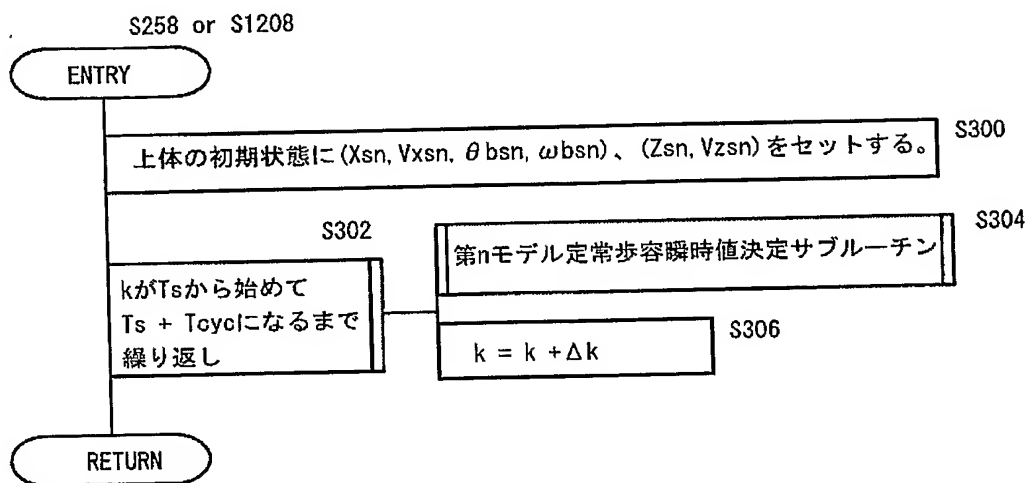
【図 16】

FIG.16

(第nモデル($n \geq 2$)定常歩容の初期発散成分の探索処理)

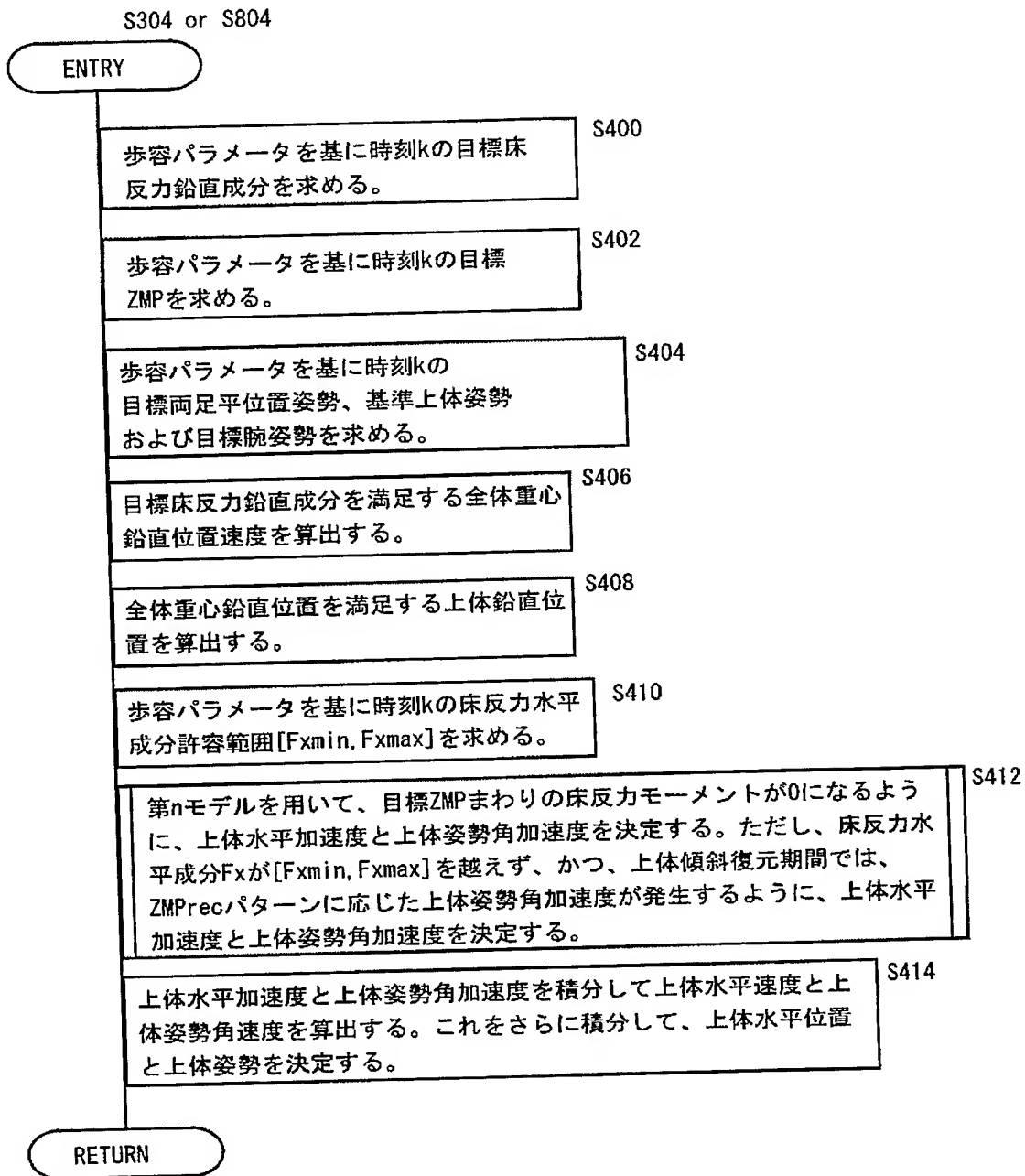
【図 17】

FIG.17

(第 $n(n \geq 1)$)モデル定常歩容の仮歩容生成処理)

【図 18】

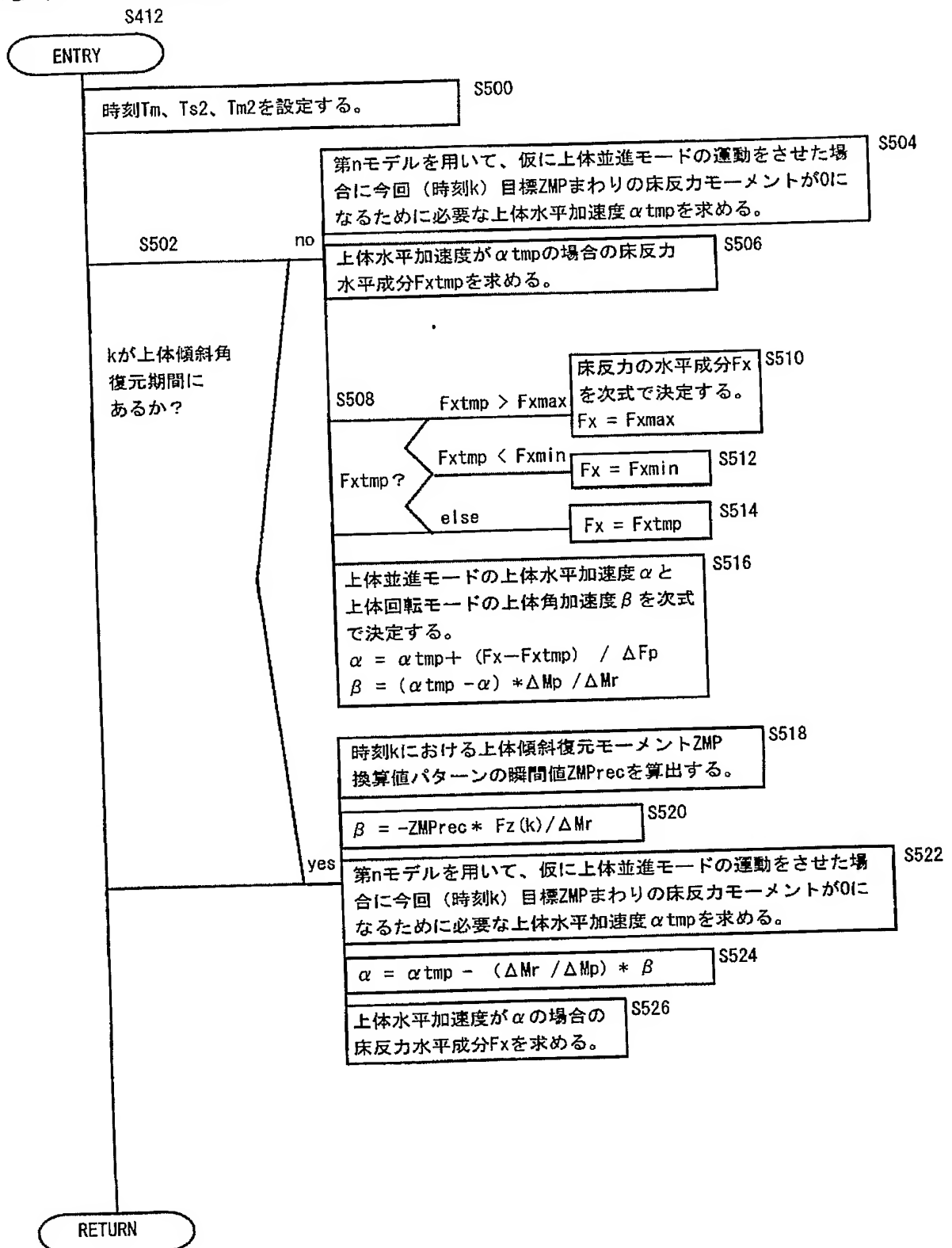
FIG.18

(第 $n(n \geq 1)$)モデル定常歩容・今回歩容瞬時値決定処理)

【図 19】

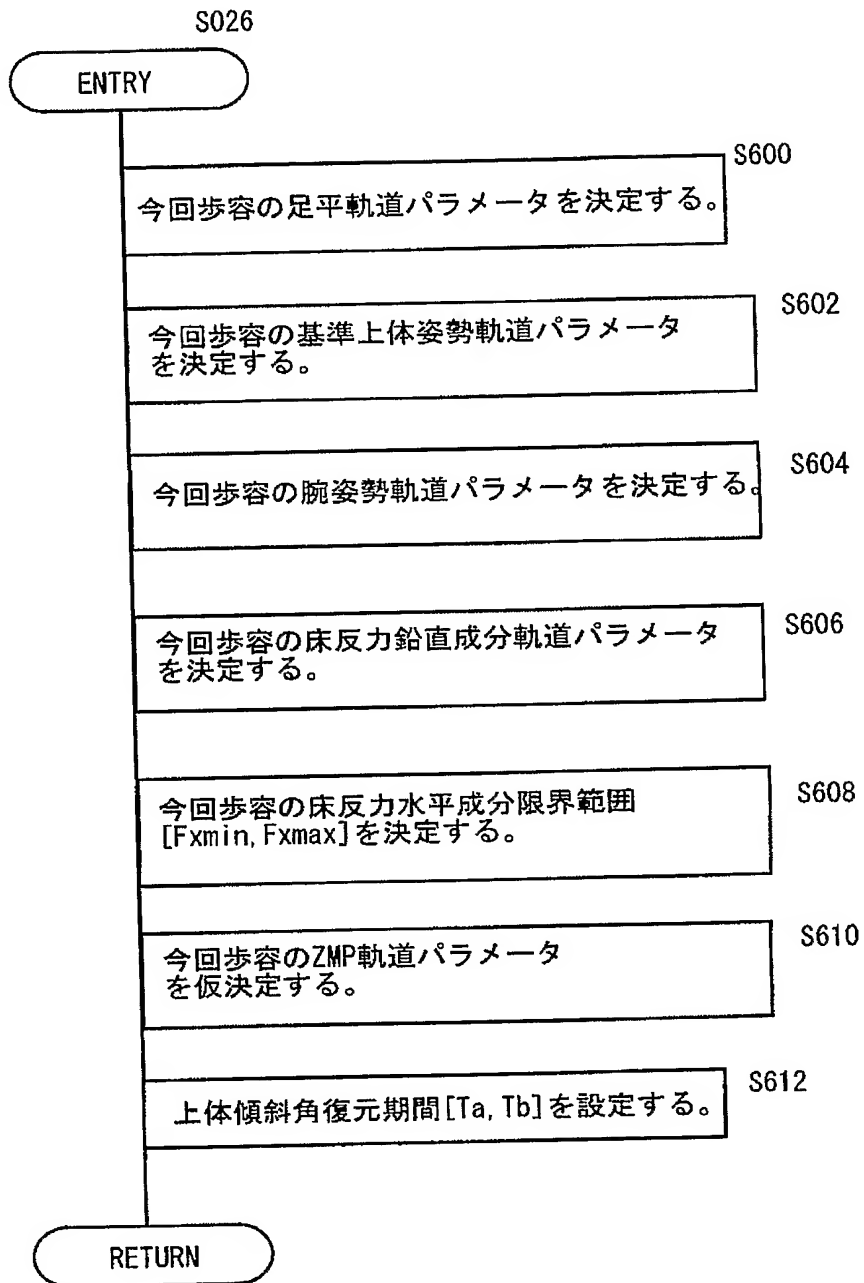
FIG.19

(定常歩容・今回歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



【図 20】

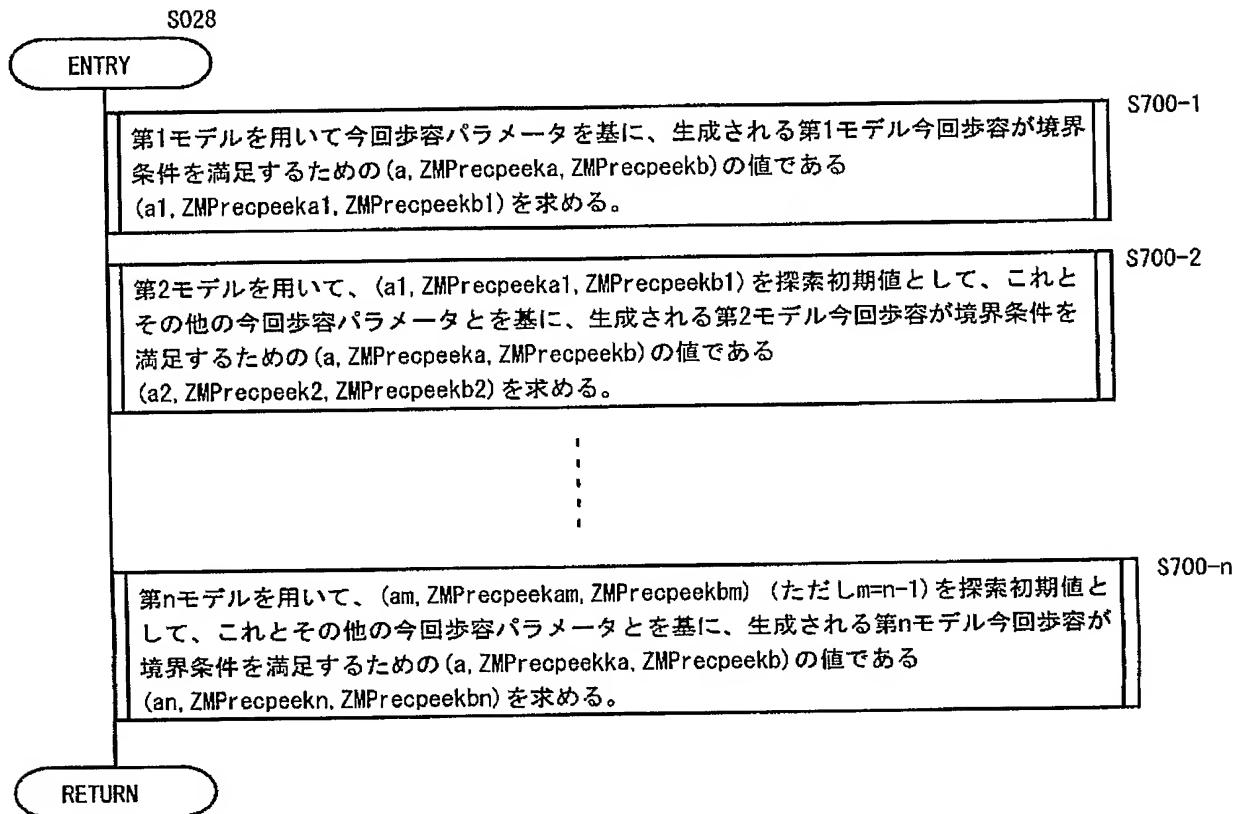
FIG.20
(今回歩容パラメータの仮決定処理)



【図 21】

FIG.21

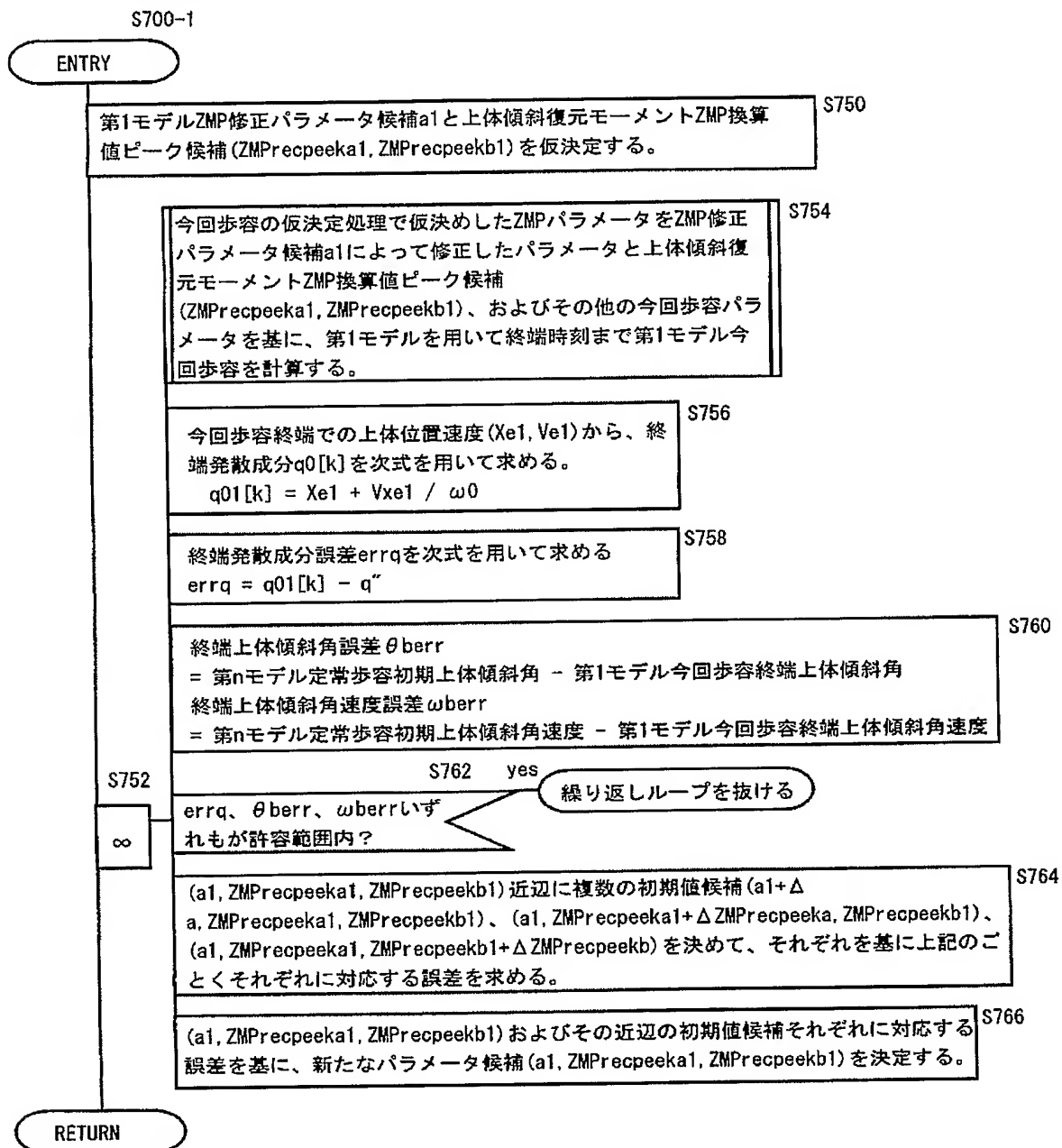
(今回歩容の歩容パラメータの段階的探索処理)



【図 22】

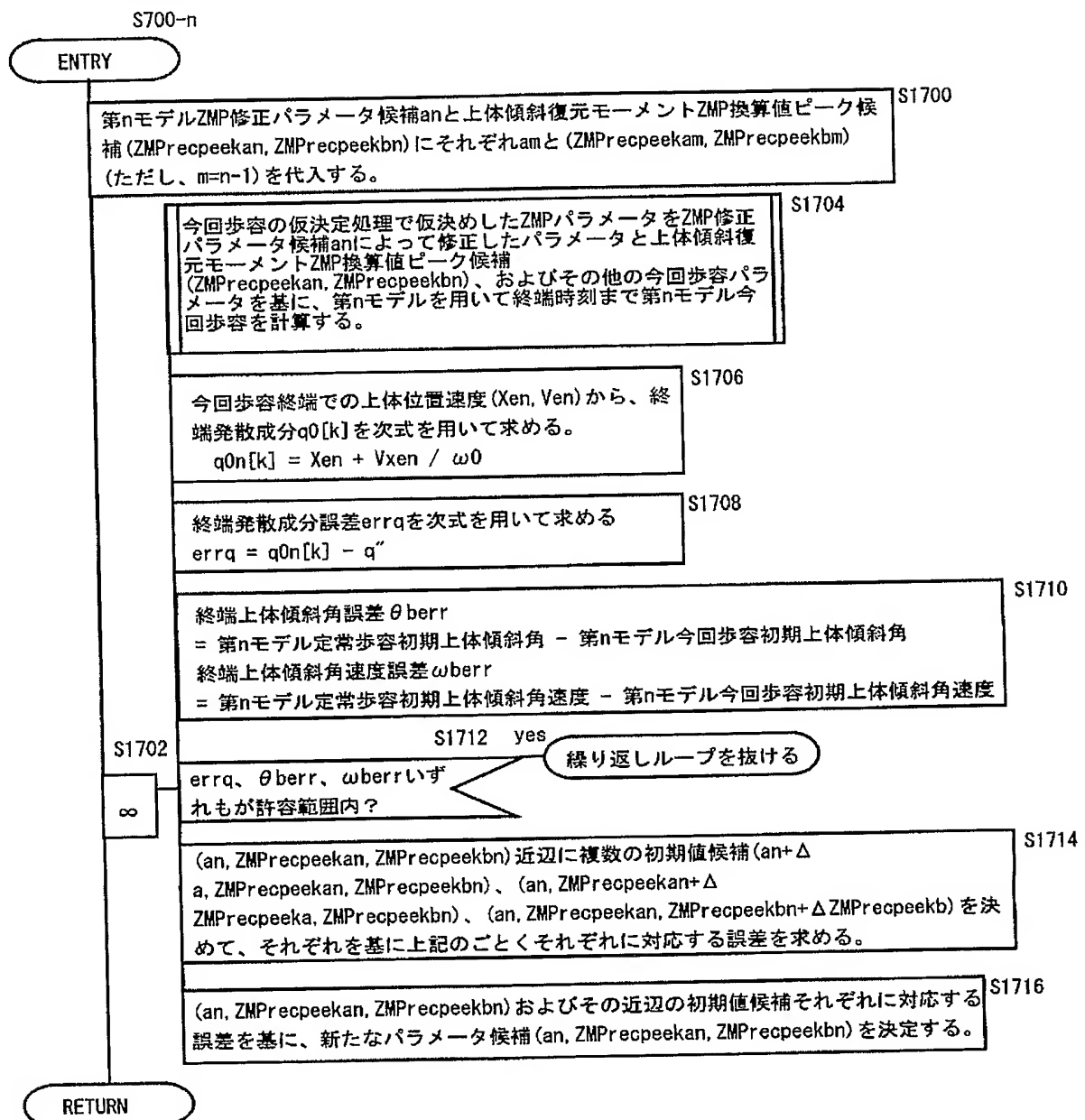
FIG.22

(探索的な第1モデル今回歩容パラメータの修正処理)



【図 23】

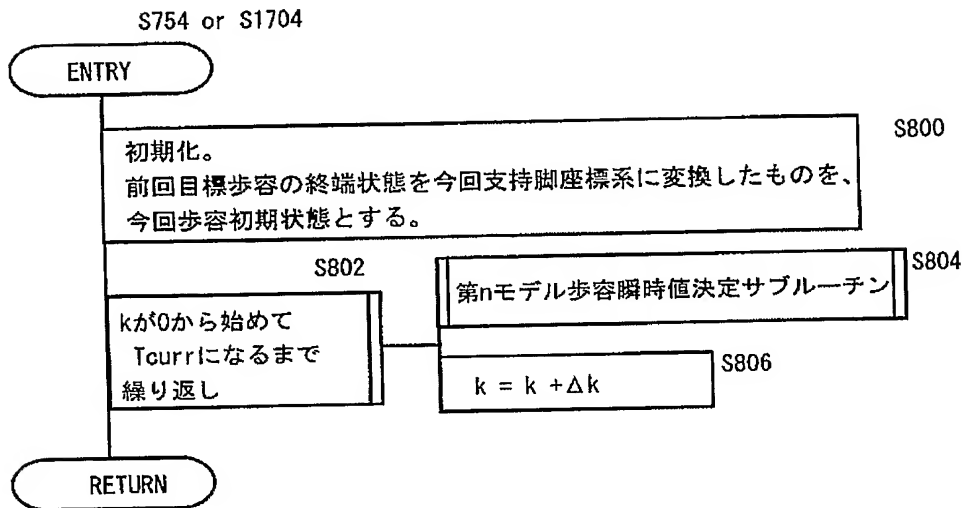
FIG.23

(探索的な第 $n(n \geq 2)$ モデル今回歩容パラメータの修正処理)

【図 24】

FIG.24

(第 $n(n \geq 1)$ モデル仮今回歩容生成処理)

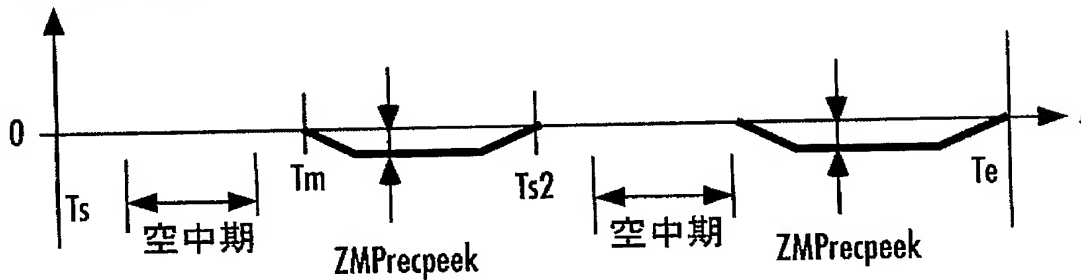


【図 25】

FIG.25

(定常歩容のZMPrecpeekの図)

上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)

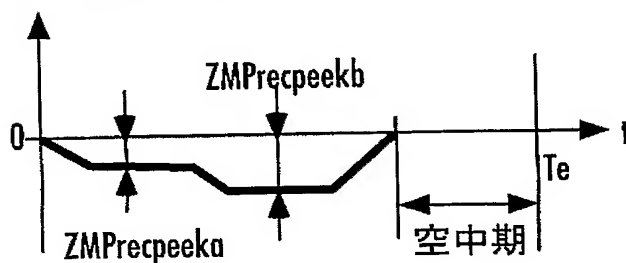


【図 26】

FIG.26

(今回歩容のZMPrecpeeka, ZMPrecpeekbの図)

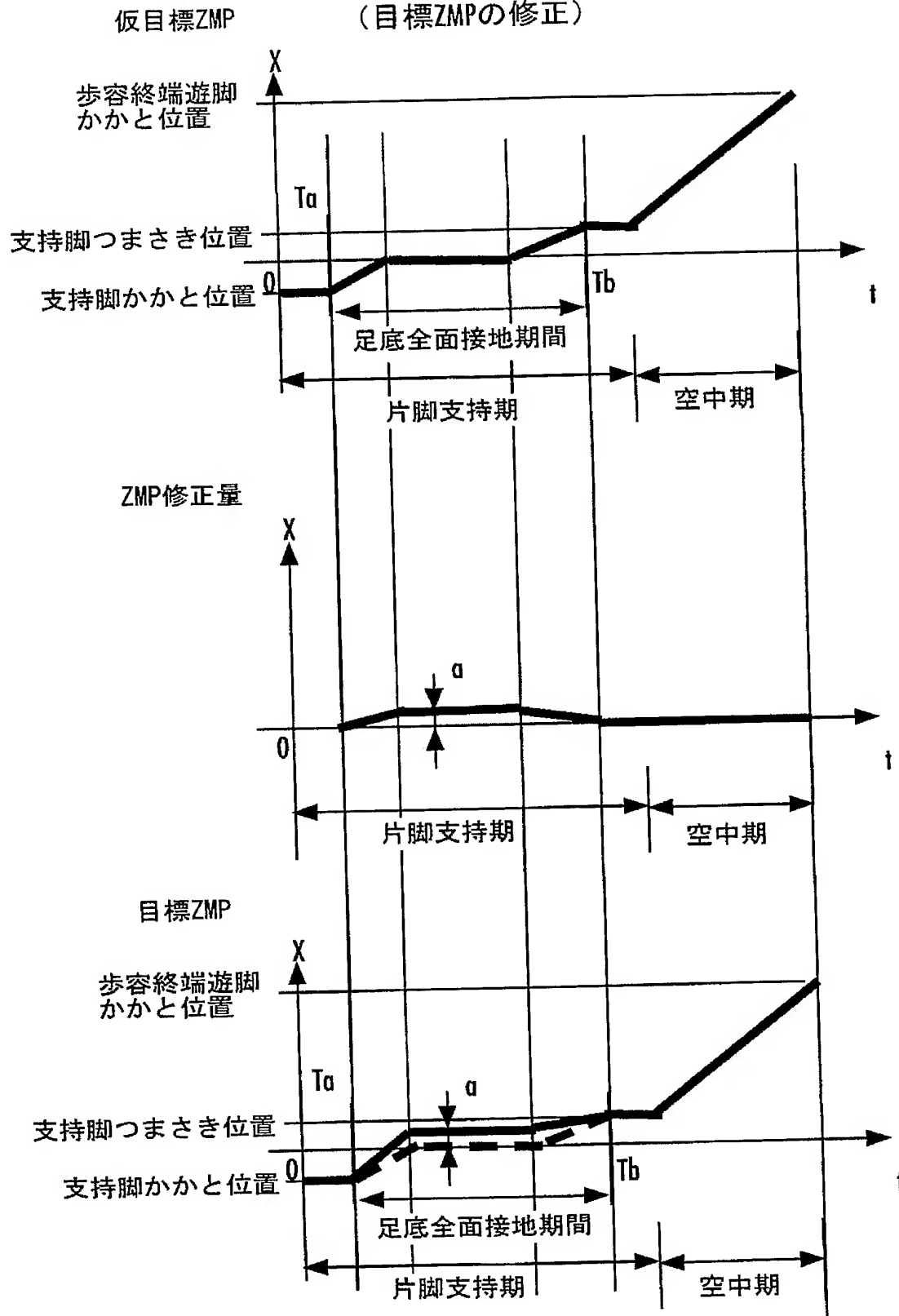
上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)



【図 27】

FIG.27

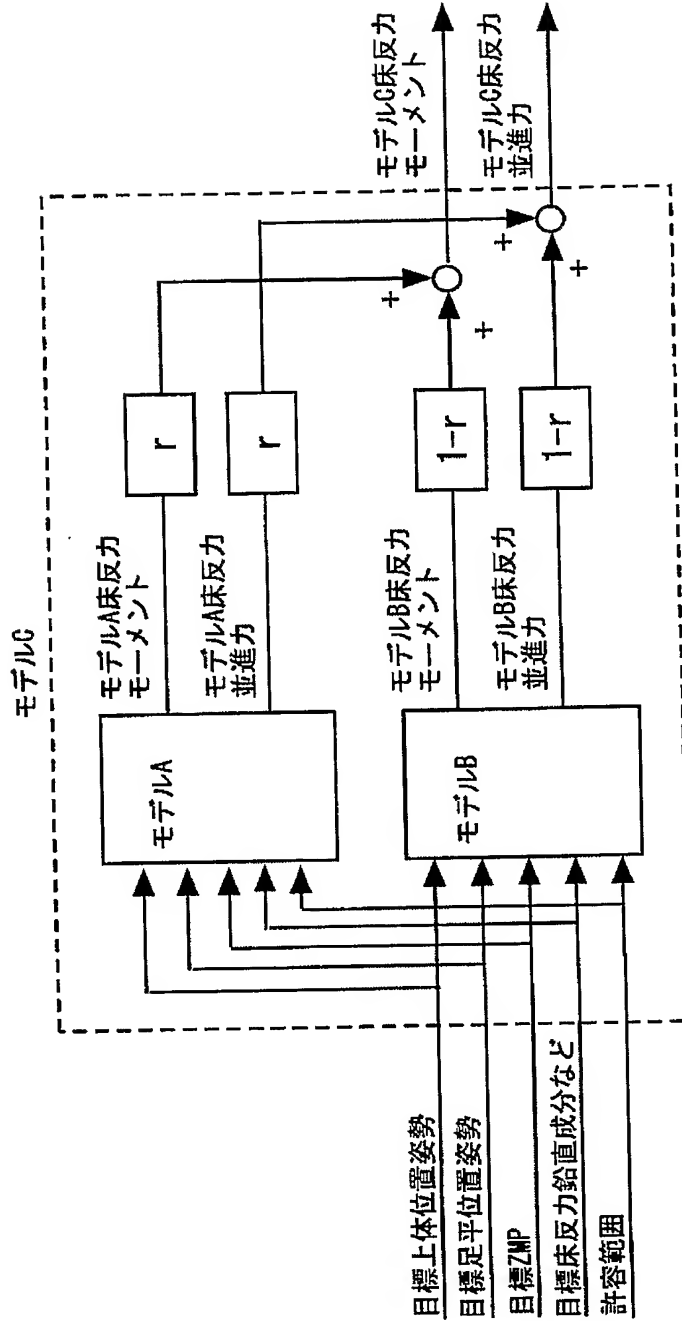
(目標ZMPの修正)



【図 28】

FIG.28

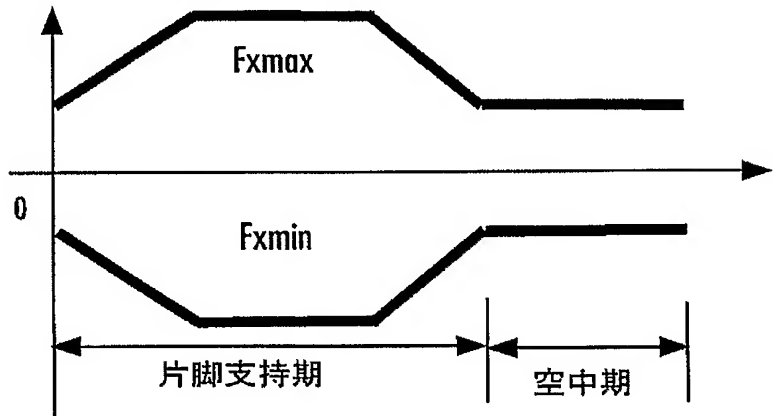
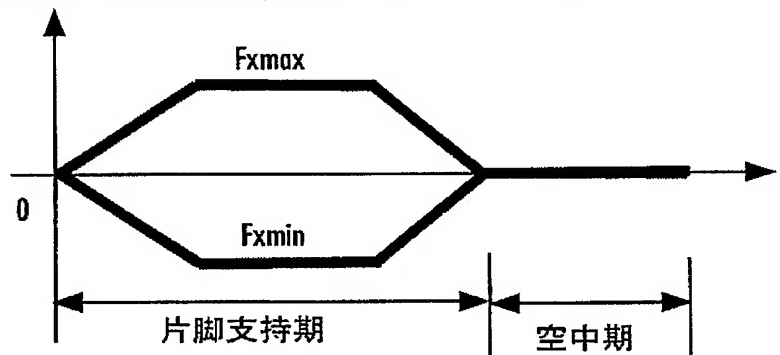
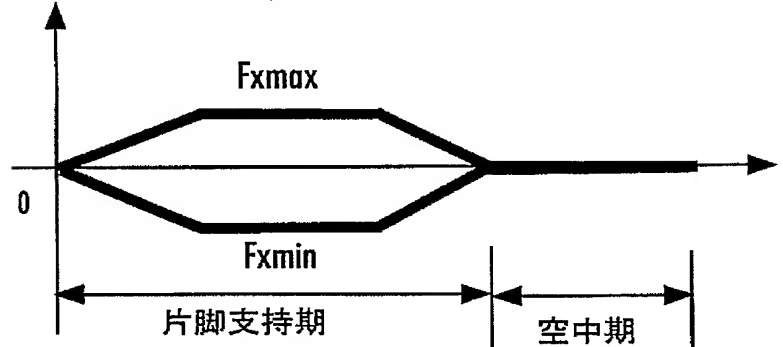
(モデルAとBの中間のモデルの構成例)



【図 29】

FIG.29

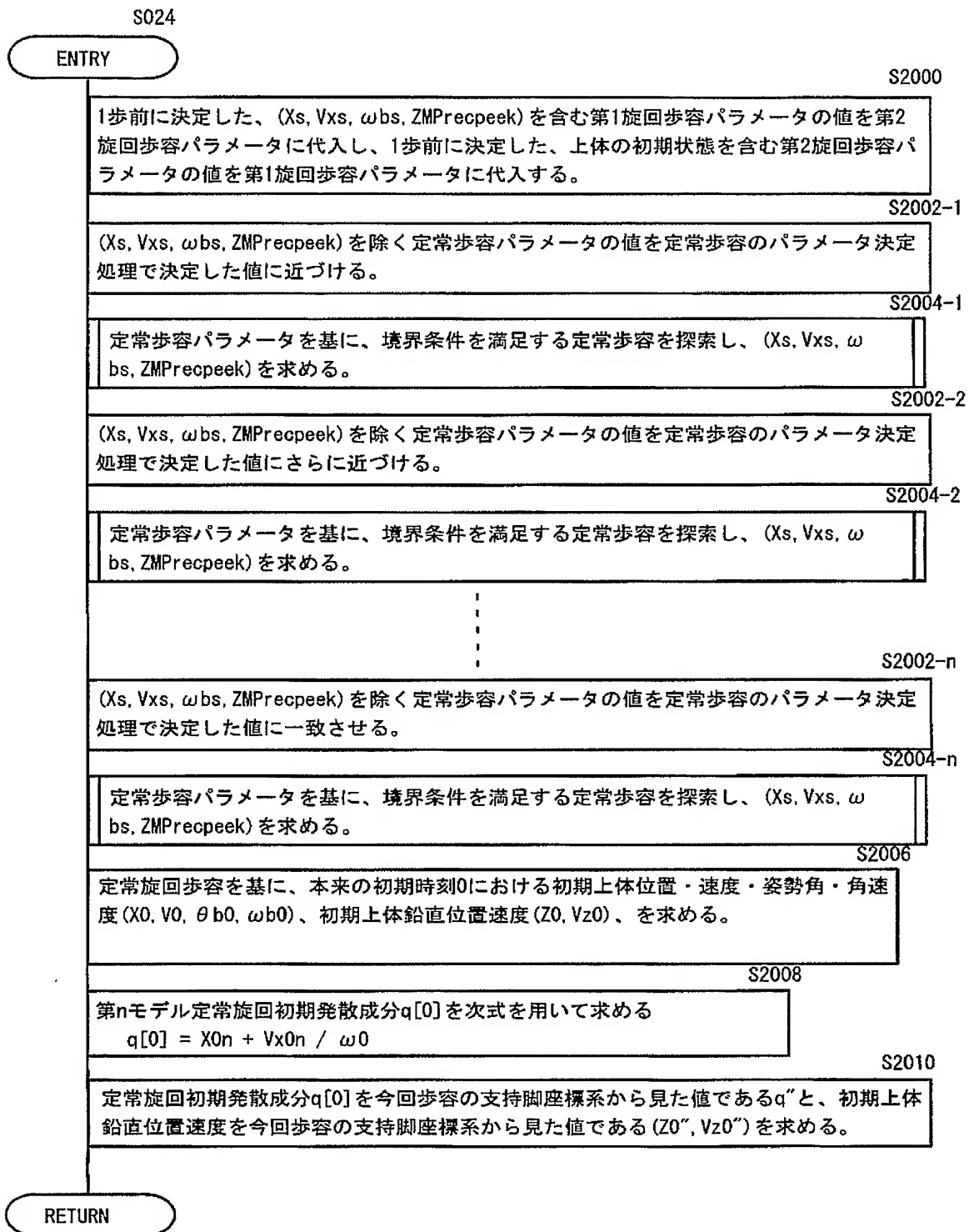
(バリエーション床反力水平成分許容範囲が徐々に狭くなる方式)

第1モデル用の F_{xmin} , F_{xmax} 第 m モデル用の F_{xmin} , F_{xmax} (ただし $1 < m < n$)第 n モデル用の F_{xmin} , F_{xmax} 

【図 30】

FIG.30

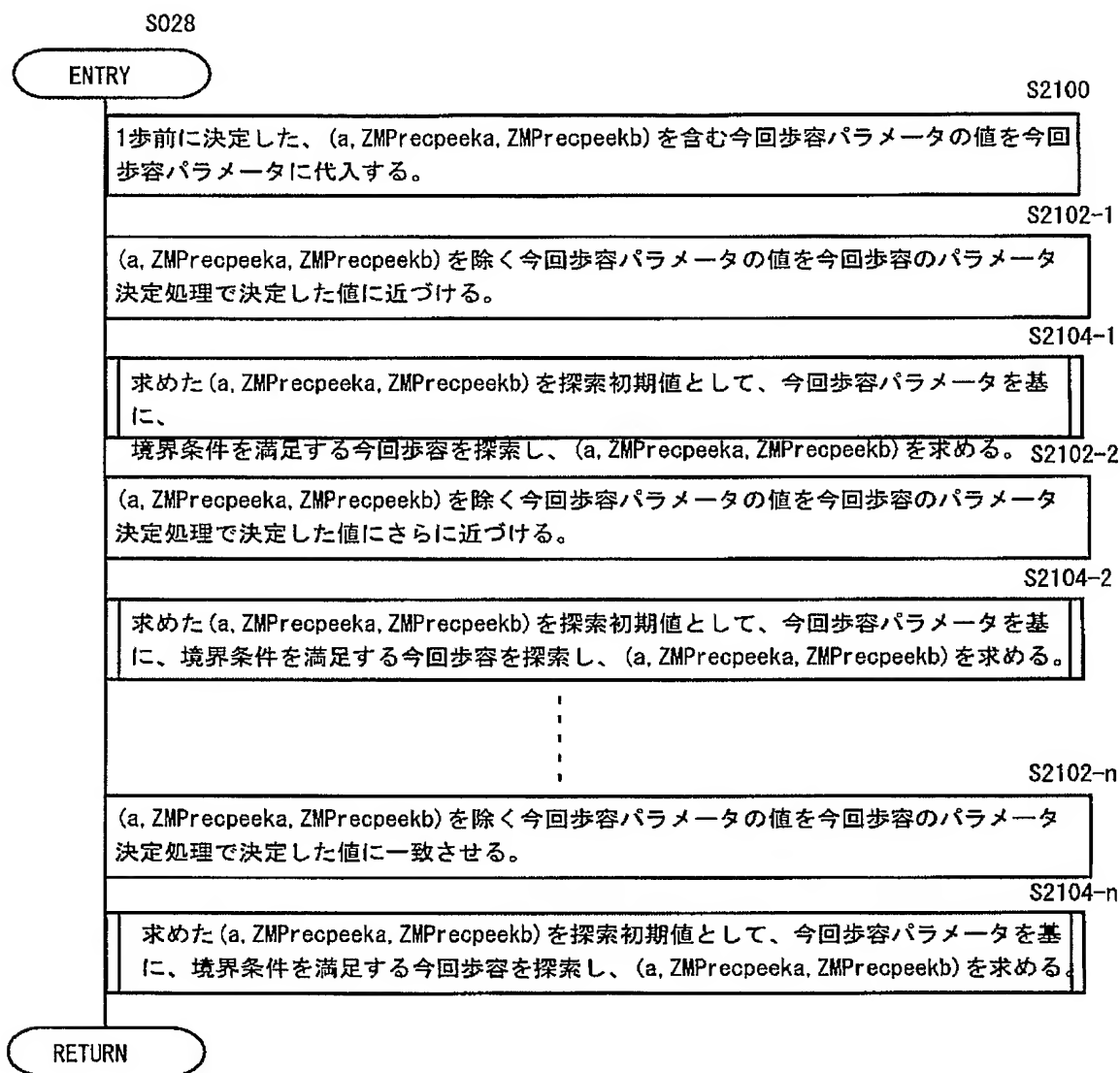
(定常歩容の初期発散成分の段階的探索処理)



【図 31】

FIG.31

(今回歩容の歩容パラメータの段階的探索処理)



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 歩容の発散を防止しつつ、所要の境界条件を高い動力学の精度で満足し得る目標歩容を効率よく生成する。

【解決手段】 歩容の要求条件を満足あるいは概ね満足するように、第 1 動力学モデルを用いて歩容パラメータを決定し、決定された歩容パラメータを基に、第 2 動力学モデルを用いて歩容を生成し、生成された歩容に対して前記要求条件からのずれを求め、前記ずれが小さくなるように、前記歩容パラメータを修正する。

【選択図】 図 1 4

特願 2 0 0 4 - 0 3 8 9 6 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 5 3 2 6]

1. 変更年月日	1 9 9 0 年 9 月 6 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都港区南青山二丁目 1 番 1 号
氏 名	本田技研工業株式会社